

Ing. Branislav Stríbrnský

Autoreferát dizertačnej práce

**OPTIMALIZÁCIA MODELOV MERADIEL AKTIVITY POUŽÍVANÝCH PRI
PREVÁDZKE A VYRAĐOVANÍ JADROVÝCH ZARIADENÍ**

na získanie akademického titulu: philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe: jadrová energetika

v študijnom odbore: elektrotechnika

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava 2023

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predkladateľ:

Ing. Branislav Stríbrnský
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

doc. RNDr. Karol Holý, CSc.
Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

doc. RNDr. Ivan Sýkora, PhD.
Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

.....

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať:
na:**

dňa o hod
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Miestnosť:

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.
Dekan FEI STU

Obsah

1	Motivácia	4
2	Ciele dizertačnej práce	4
3	Stručný prehľad súčasného stavu problematiky	4
4	Modelovanie vo výpočtovom kóde MCNP5	6
4.1	Modelovanie HPGe detektora	7
4.2	Modelovanie detektorov s anorganickým scintilačným kryštálom	12
4.3	Modelovanie plastového scintilačného detektora	14
4.4	Optimalizácia meradla aktivity kvapalných výpustí	18
5	Dosiahnuté výsledky a prínosy pre rozvoj vednej disciplíny	23
6	Zoznam použitej literatúry	25
7	Publikačná činnosť autora	28
8	Summary	30

1 Motivácia

Gamaspektrometria je efektívna metóda pre stanovovanie aktivity rádioaktívnych materiálov. Podstatou gamaspektrometrie je umiestnenie meraného materiálu (vzorky) do blízkosti detektora a získanie spektra. Následná analýza spektra umožňuje vykonať kvalitatívnu a kvantitatívnu analýzu.

Rozhodujúcim parametrom kvalitatívnej analýzy je energetické rozlíšenie detektora, ktoré umožňuje rozlíšiť rádionuklidy emitujúce fotóny gama blízkych energií. Kvantitatívna analýza závisí najmä od účinnosti detekcie použitého detektora a geometrie merania. Pre zabezpečenie kvality merania aktivity je nevyhnutné dosiahnuť vysokú presnosť detekčnej účinnosti

Jednou z možností stanovenia detekčnej účinnosti je matematické modelovanie detektorov vo výpočtových kódach. Pomocou modelovania je možné vypočítať detekčné účinnosti v podstate pre ľubovoľnú geometriu. To je zaujímavé z pohľadu stanovenia detekčnej účinnosti pre netypické geometrie merania, ale tiež z pohľadu návrhu a optimalizácie meradiel. Základným predpokladom modelovania je schopnosť vytvoriť reprezentatívne modely detektorov, resp. meradiel. Najčastejším problémom je nedostupnosť informácií o skutočnej geometrii detektora. Pre stanovenie týchto parametrov je často potrebné vykonať veľké množstvo analýz. Je preto potrebné navrhnúť, optimalizovať a používať efektívne postupy pre stanovovanie skutočných parametrov detektora, čím dôjde k zvýšeniu presnosti modelov. Predkladaná práca sa preto zameriava na predmetnú problematiku a tak sa snaží prispieť k rozvoju vednej disciplíny.

2 Ciele dizertačnej práce

V práci boli vymedzené nasledovné ciele.

1. Popísať súčasný stav problematiky merania aktivity kontaminovaných predmetov a materiálov pri prevádzke a vyradovaní jadrových zariadení. Uviesť metrologické a legislatívne požiadavky na meradlá aktivity.
2. Zostaviť prehľad súčasných meracích systémov spolu s ich základnými charakteristikami.
3. Vytvoriť MCNP modely najčastejšie využívaných scintilačných detektorov (NaI:TI, LaBr₃:Ce, plast) a polovodičového detektora HPGe. Navrhnúť efektívne spôsoby zvýšenia presnosti validácie úpravou modelu detektora.
4. Zhodnotiť parametre vybraného meradla aktivity. Vytvoriť model a navrhnúť spôsoby optimalizácie parametrov meradla.

3 Stručný prehľad súčasného stavu problematiky

Počas prevádzky a v procese vyradovania jadrových elektrární (JE) je nevyhnutné merať aktivitu veľkého množstva materiálov a predmetov. Môže sa jednať o rádioaktívne odpady (RAO), potenciálne kontaminované materiály, predmety vynášané z kontrolovaného pásma a podobne. Stanovenie aktivity, resp. úrovne kontaminácie je možné preveriť len meraním. Potreba merania vychádza najmä zo zabezpečenia radiačnej ochrany, ktorej cieľom je zabezpečiť systém technických opatrení alebo organizačných opatrení na obmedzenie ožiarenia fyzických osôb od zdrojov ionizujúceho žiarenia [1].

Základnou veličinou v radiačnej ochrane je efektívna dávka. Priame meranie dávky môže byť problematické najmä pri uvoľňovaní materiálov do životného prostredia (ŽP), pri hodnotení vplyvu prevádzky jadrového zariadenia na obyvateľstvo a ŽP, pri hodnotení bezpečnosti úložiska pre rádioaktívne odpady a podobne. Preto je v týchto prípadoch rozumnejšie, a zároveň aj nevyhnutné, vyjadrovať dávku obdržanú jednotlivcom alebo skupinou cez odvodené veličiny. Napr. pri uvoľňovaní materiálov do životného prostredia (ŽP) sa ako odvodené veličiny využívajú oslobodzovacie a uvoľňovacie úrovne definované ako limitné hodnoty hmotnostnej, objemovej alebo povrchovej aktivity definované v legislatíve. Meraním sa musí preukázať, že pri uvoľňovaní materiálov neprekročí aktivita stanovené hodnoty.

Materiálová a geometrická rôznorodosť meraných materiálov vytvára rôzne požiadavky na dizajn meradiel. Jedná sa v prvom rade o požiadavky legislatívne priamo súvisiace s radiačnou ochranou. S legislatívnymi požiadavkami ďalej súvisia požiadavky metrologické, ktoré majú zabezpečiť

reprezentatívnosť, spoľahlivosť a dôveryhodnosť výsledkov merania. Na meradlá sú však kladené aj požiadavky praxe, ktorých cieľom je najmä vytvorenie vhodných podmienok pre vykonanie samotného merania. Je zrejmé, že rôzne požiadavky sú kladené na meradlá povrchovej kontaminácie a meradlá objemovej aktivity, iné požiadavky na meradlá obalových súborov ako napr. sudov, a iné na meradlá in-situ. Ďalšími požiadavkami praxe sú schopnosť meradla merať rôzne typy žiarenia rôznych energií, zabezpečiť dostatočne nízky detekčný limit pri rôznej úrovni pozadia, zabezpečiť homogenitu odozvy meradla, alebo zabezpečiť vysokú priepustnosť meradla. V neposlednom rade treba uvážiť aj obstarávacie a prevádzkové náklady pre dané meradlo. Splnenie tých ktorých požiadaviek si vyžaduje najmä voľbu vhodných detektorov, voľbu vhodnej geometrie merania, použitie tienenia a iné.

Meradlá možno rozdeliť podľa viacerých kritérií. Najzákladnejším kritériom je merací rozsah aktivity, podľa ktorého delíme meradlá na meradlá rádioaktívnych odpadov a meradlá pre uvoľňovanie materiálov do životného prostredia. Meradlá rádioaktívnych odpadov sú určené najmä na triedenie rádioaktívnych odpadov podľa úrovne ich aktivity, či už z pohľadu ďalšieho spracovania alebo potvrdenia splnenia akceptačných kritérií pre ich uloženie do úložiska. Meradlá pre uvoľňovanie materiálov do životného prostredia slúžia najmä na potvrdenie splnenia uvoľňovacích a oslobodzovacích úrovní pre uvádzanie materiálov do životného prostredia. Jedná sa najmä o meradlá pre zisťovanie kontaminácie materiálov a predmetov vynášaných z kontrolovaného pásma, meradlá pre uvoľňovanie častí technologických zariadení a stavebných objektov, ako počas prevádzky, tak aj v procese vyradovania a pod.

Komplexné zhodnotenie parametrov meradla je samozrejme možné vykonať až po jeho skonštruovaní. Z praktických dôvodov je ale pre návrh meradla a hodnotenie jeho parametrov rozumnejšie využiť modelovanie vo výpočtových kódoch. Podobne je tiež možné vykonávať optimalizáciu meradiel. Základným predpokladom pre modelovanie meradiel je zostavenie validovaných modelov v meradlách používaných detektorov. V meradlách RAO a v meradlách kontaminácie sa najčastejšie využívajú detektory založené na detekcii žiarenia gama. V tejto práci sú preto zostavené a optimalizované modely práve týchto najčastejšie využívaných detektorov: HPGe polovodičového detektora, detektora s anorganickým scintilačným kryštálom a veľkoobjemového plastového scintilačného detektora. Modelovanie každého z uvedených detektorov je do značnej miery podobné, ale každá z skupín detektorov má svoje špecifiká, ktoré je nevyhnutné brať do úvahy.

Vo všeobecnosti možno povedať, že modelovanie detektorov je oblasť, ktorá je do značnej miery prebádaná. Na druhej strane treba povedať, že detekčné materiály sa neustále vyvíjajú, vylepšujú sa ich vlastnosti a taktiež sa hľadajú nové materiály. Modelovanie detektorov a detekčných systémov je dôležité najmä z pohľadu praxe, kde treba stále riešiť mnohé problémy a zdolať nové výzvy. To vytvára požiadavky na vylepšovanie a optimalizáciu modelov detektorov, na zefektívnenie existujúcich, a zavedenie nových postupov pre proces efektívneho modelovania, a to nie len z pohľadu modelovania samotného, ale aj z pohľadu presnosti validácie modelu.

Táto práca sa prioritne zaoberá meradlami rádioaktívnych odpadov a potenciálne kontaminovaných materiálov založených na detekcii žiarenia gama. Prvá časť práce sa zaoberá normatívnymi a legislatívnymi požiadavkami, ktoré sú kladené na meradlá pre manažment RAO. Ďalej sú zosystematizované na trhu dostupné meracie systémy RAO, ich typické vlastnosti a parametre a taktiež detektory najčastejšie využívané v daných systémoch. Druhá časť práce sa venuje modelovaniu detektorov a meracích systémov vo výpočtovom kóde MCNP5. Boli vytvorené podrobné modely polovodičového HPGe detektora, scintilačných detektorov s anorganickým kryštálmi $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ a NaI:Tl a veľkoobjemového plastového scintilačného detektora. V ďalšej časti práce je vykonaná optimalizácia meradla kvapalných výpustí. V závere práce sú stručne zhrnuté dosiahnuté poznatky a načrtnutý ďalší možný rozvoj v tejto problematike. Nižšie sú zosumarizované najzásadnejšie závery dizertačnej práce.

4 Modelovanie vo výpočtovom kóde MCNP5

Jedným z cieľov práce bolo zostaviť validované modely HPGe detektora, detektora s anorganickým scintilačným kryštálom a veľkoobjemového plastového scintilačného detektora. Pre modelovanie boli vybrané nasledovné detektory:

- HPGe detektor **GC0518** (výrobca Mirion)
- NaI:Tl scintilačný detektor **802-2X2** (výrobca Canberra)
- LaBr₃:Ce scintilačný detektor **51S51/2** (výrobca Saint Gobain)
- Plastový scintilačný detektor **SPD 200.100.100** (výrobca Nuvia)

Modelovanie detektorov vyžaduje detailné znalosti o geometrickom usporiadaní a materiálovom zložení jednotlivých častí detektora. Problémom je, že mnohé informácie nemusia byť dostupné a musia byť práčne stanovované a optimalizované. Modelovanie anorganických scintilačných detektorov je pomerne jednoduché, pretože detektory sú vyrábané v štandardných geometriách a technická dokumentácia k nim je dobre dostupná. Modelovanie HPGe detektorov je komplikovanejšie, pretože každý detektor je svojim spôsobom originál. Keďže detektor ako celok je zapuzdrený v hliníkovom obale („endcap“), stanoviť skutočnú geometriu je často problematické a výrobcovia detektorov často poskytujú len nekompletnú technickú dokumentáciu. Navyše, špecifikom HPGe detektorov je tzv. mŕtva vrstva germánia na povrchu kryštálu, ktorá nie je detekčne citlivá na ionizujúce žiarenie a ktorá sa môže meniť v čase. Modelovanie plastových scintilačných detektorov je jednoduché z pohľadu geometrie detektora, ale absencia píku úplnej absorpcie v spektre vyžaduje špecifické prístupy pre energetickú kalibráciu nameraných spektier a s tým spojenú validáciu výpočtového modelu, ako aj fakt, že v nameraných spektrách sa výrazne prejavujú svetelné efekty, ktorých modelovanie je náročné.

Pre modelovanie detektorov bol v tejto práci využitý výpočtový kód MCNP5 (Monte Carlo N-Particle) [2], ktorý je dostupný na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU. MCNP5 je mnohostranný výpočtový kód vhodný pre výpočty problémov založených na transporte neutrónov, fotónov, elektrónov, prípadne ich kombinácií. MCNP je stochastický kód založený na metóde Monte Carlo (mnohonásobný pokus na základe pseudonáhodných čísel). Vstupný súbor výpočtu musí obsahovať informácie o geometrii, o materiálovom zložení uvažovaných geometrických celkov, o zdroji častíc; type výstupu (tally), počte výpočtových histórií, prípadne ďalšie dáta. Na výpočty bola použitá verzia kódu 5 s účinnopriehľadnými knižnicami ENDF/B-VI. Vo výpočtoch boli využívané tallies F8 (pulse height tally), kedy kód počíta energetickú distribúciu pulzov v detektore. Zdroje fotónov boli modelované ako izotropné zdroje. Pri výpočte spektier sa uvažoval počet histórií korešpondujúci s počtom častíc v reálnom meraní. Pri výpočtoch detekčných účinností sa využíval výpočet v monoenergetických behoch.

Stanovenie vstupných parametrov výpočtu a zostavenie modelu

Modelovanie detektora v MCNP možno rozdeliť do niekoľkých častí.

1. Stanovenie energetického rozlíšenia a výpočet detekčných účinností na základe validačných meraní.
2. Zostavenie modelu na základe technickej dokumentácie.
3. Vykonanie výpočtov v MCNP a porovnanie výsledkov s výsledkami meraní.
4. Optimalizácia modelu a opakovanie bodu 3.

Špeciálny prístup v MCNP kóde vyžaduje zohľadnenie energetického rozlíšenia vo vypočítanom spektre, ktoré je v reálnom spektre dôsledkom štatistických fluktuácií v procese interakcie žiarenia s detekčne citlivým objemom detektora, zberu nosičov náboja v polovodičových detektoroch, zberu scintilačných fotónov a svetelných efektov v scintilačných detektoroch, produkcie elektrických pulzov, šumu elektrických komponentov spektrometrickej trasy a pod. Bohužiaľ, kód MCNP nevie efekty spôsobujúce energetické rozlíšenie modelovať, pretože kód počíta len energiu ionizujúceho žiarenia odovzdanú detekčne citlivému objemu detektora. Aby bolo vo vypočítaných spektrách zohľadnené

energetické rozlíšenie detektora, treba ho v kóde MCNP dodefinovať nasledovnou funkciou [2]:

$$FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (1)$$

kde $FWHM$ je energetické rozlíšenie v MeV, E je energia v MeV a a , b a c sú konštanty získané z merania kalibračných štandardov. Konštanty a , b a c je možné zadať do vstupného súboru prostredníctvom karty GEB. Kód MCNP potom energiu každého pulzu redistribuuje podľa Gaussovho rozdelenia, pričom $FWHM = 2,35\sigma$.

4.1 Modelovanie HPGe detektora

V nasledovnej tabuľke sú zosumarizované základné parametre modelovaného HPGe detektora.

Tab. 1: Parametre modelovaného HPGe detektora poskytnuté výrobcom.

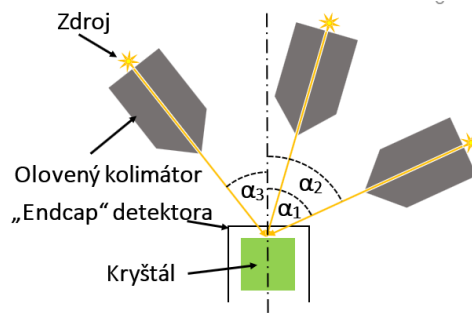
Parameter	Hodnota
Výrobca	Mirion Technologies, Belgicko.
Typ	GC 0518
Relatívna účinnosť	5 %
Energetické rozlíšenie (1332 keV)	1,8 keV
Peak / Compton	32 / 1
Tvar kryštálu	Koaxiálny
Dĺžka a priemer kryštálu	$35,3 \pm 0,3$ mm / $40,3 \pm 0,2$ mm
Hrúbka mŕtvej vrstvy	1,2 mm
Dĺžka a priemer vnútorného otvoru	21,5 mm / 10,0 mm
Vzdialenosť endcapu a kryštálu	6 mm
Hrúbka endcapu	$1,5 \pm 0,1$ mm
Chladenie	N ₂ 30 l Dewar
Kryostat	7905 – 30SL

Pre validáciu modelov boli merané bodové kalibračné etalóny (^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{241}Am) a 450 ml Marinelliho nádoby (^{60}Co , ^{137}Cs). Marinelliho nádoby boli merané v kontaktnej geometrii, bodové etalóny boli merané v troch pozíciách: na osi detektora vo vzdialenostiach 10 cm od čela endcapu detektora, 25 cm od čela endcapu detektora (tzv. „relative efficiency geometry“) a v rovine čela endcapu detektora vo vzdialenosti 25 cm od radiálnej steny endcapu. Z meraní boli stanovené detekčné účinnosti (uvedené neskôr) a koeficienty funkcie energetického rozlíšenia nasledovne: $a = 8,40 \times 10^{-4} \text{ MeV}$, $b = 3,68 \times 10^{-5} \text{ MeV}^{1/2}$ a $c = 2,81 \times 10^0 \text{ MeV}^{-1}$.

Počas modelovania sa ukázalo, že pri uvažovaní geometrických parametrov detektora výlučne podľa dokumentácie výrobcu nevykazujú namerané a vypočítané píkove účinnosti dostatočnú zhodu (vypočítané hodnoty boli vyššie o cca 10 % ako namerané). Preto bolo pristúpené k vykonaniu dodatočných analýz za účelom potvrdenia, resp. optimalizácie niektorých geometrických parametrov detektora. Mnohé geometrické parametre sú, samozrejme, určiteľné prostredníctvom rádiografie [3]. Keďže táto technika nie je na našom pracovisku k dispozícii, bolo pristúpené k návrhu a vykonaniu analýz bez použitia tejto techniky. Analýzy boli vykonané aj z dôvodu preverenia, či by ich bolo možné použiť pri stanovovaní geometrických parametrov detektorov, pre ktoré tieto nie sú dostupné od výrobcu.

Stanovenie hrúbky mŕtvej vrstvy germánia

Typický koaxiálny kryštál má dva kontakty. N kontakt sa vytvára difundovaním lítia na povrchu germánia (hrúbka na úrovni 1 mm v rozsahu niekoľkých desiatin mm), P kontakt sa vytvára implantáciou bóru na vnútornej stene otvoru kryštálu, a jeho hrúbka je na úrovni desiatin mikrometrov. Kontakty nie sú citlivé na ionizujúce žiarenie. Lítiový kontakt spôsobuje zmenšenie detekčne citlivého objemu detektora a zároveň sa správa ako pridaný absorbátor. Najčastejšou metódou pre stanovenie hrúbky mŕtvej vrstvy je metóda založená na meraní úzkeho dobre kolimovaného zväzku relatívne nízko energetických (blízko povrchu kryštálu interagujúcich) fotónov dopadajúcich pod rôznymi uhlami.



Obr. 1: Náčrt merania pre stanovenie mŕtvej vrstvy germánia.

Metóda je založená na fakte, že časť na detektor dopadajúcich fotónov je absorbovaná v konštrukčnom materiáli detektora (endcap, prípadne konštrukčná časť držiaku kryštálu), časť v mŕtvej vrstve germánia a ostatná časť v detekčne citlivom objeme kryštálu. Pri dopade fotónov pod rôznymi uhlami sa mení počet v absorbátoroch absorbovaných, a tým aj počet detegovaných, fotónov. Na základe geometrie a detegovaných početností z meraní, kedy v každom meraní dopadajú na detektor fotóny pod rôznym uhlom, sme odvodili vzťah pre stanovenie hrúbky mŕtvej vrstvy germánia d_{DL} :

$$d_{DL} = - \frac{\ln \left(\frac{\frac{N_{\alpha_1}}{N_{\alpha_2}}}{e^{-\mu_{Al} d_{Al} \left(\frac{1}{\cos(\alpha_1)} - \frac{1}{\cos(\alpha_2)} \right)}} \right)}{\mu_{DL} \left(\frac{1}{\cos(\alpha_1)} - \frac{1}{\cos(\alpha_2)} \right)} \quad (2)$$

kde $N_{\alpha_1} N_{\alpha_2}$ sú detegované početnosti z meraní fotónov dopadajúcich na detektor pod uhlami α_1 a α_2 , μ_{Al} je lineárny súčiniteľ zoslabenia pre hliník ako absorbátor, d_{Al} je hrúbka hliníka ako absorbátora medzi kryštálom a zdrojom, a μ_{DL} je lineárny súčiniteľ zoslabenia pre mŕtvu vrstvu, t.j. germánium.

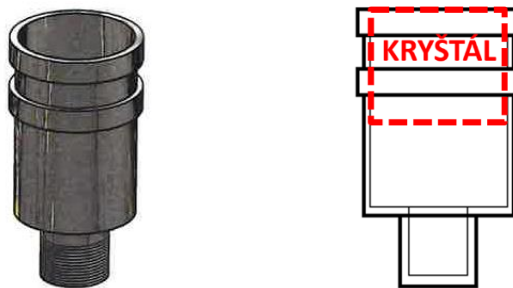
Stanovenie hrúbky mŕtvej vrstvy pre vyšetrovaný detektor bolo vykonané za použitia zdroja fotónov ^{242}Am (59 keV) s použitím 10 cm dlhého oloveného kolimátora s priemerom 2 mm. Boli vybrané merania pod uhlami 0° a 45° . So zohľadnením tolerancií v technickej dokumentácii výrobcu, hrúbka hliníkového absorbátora je v intervale medzi 1,9 mm a 3,1 mm. Preto boli vypočítané dve hrúbky mŕtvej vrstvy zodpovedajúce týmto dvom hraničným hrúbkam hliníkového absorbátora.

Tab. 2: Odhad hrúbky mŕtvej vrstvy germánia a vstupné parametre pre jej výpočet.

Početnosť nameraná pri uhle 0°	$2,150 \pm 0,045$
Početnosť nameraná pri uhle 45°	$1,176 \pm 0,023$
Hrúbka hliníkového absorbátora	1,9 mm – 3,1 mm
Odhadnutá hrúbka mŕtvej vrstvy germánia	1,279 mm – 1,362 mm
Hrúbka mŕtvej podľa dokumentácie výrobcu	1,2 mm

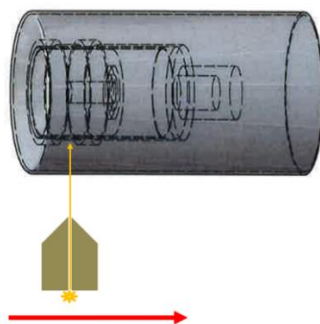
Stanovenie tvaru držiaku kryštálu

Germániový kryštál býva v detektore upevnený v držiaku („holder“ alebo „mounting cup“), ktorý je vyrobený z hliníka, resp. zo zliatiny medi a hliníka. Typický tvar držiaku kryštálu v HPGe detektoroch Canberra / Mirion je na **Obr. 2**. Ako vidno na obrázku, držiak má tvar rotačnej súčiastky vo vnútri ktorej je upevnený kryštál. Problémom je, že stena držiaku nemá konštantnú hrúbku a nachádzajú sa na nej dve hrubšie miesta (prstence). Porovnanie dokumentácie pre niekoľko detektorov firmy Canberra resp. Mirion (2 GC0518, 2 GX4020) ukazuje, že rozmery prstencov sú rovnaké pre všetky vyšetrované detektory, ale ich pozícia je rôzna. Prítomnosť prstencov ako absorbátorov má vplyv na účinnosť detekcie z bočnej (radiálnej) strany detektora, najmä pre nižšie energie. Pre reprezentatívny model detektora je preto nevyhnutné stanoviť presnú polohu prstencov držiaku kryštálu.

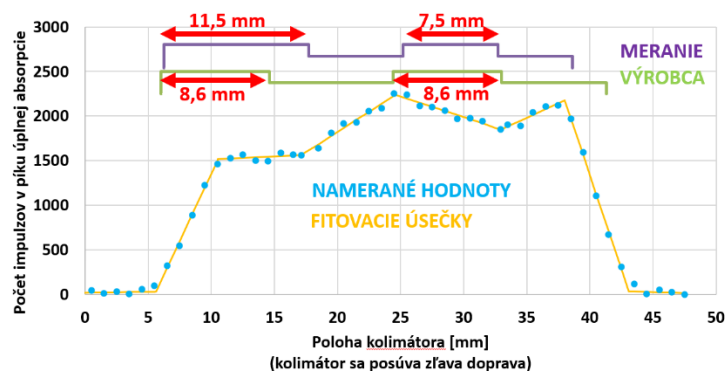


Obr. 2: Náčrt držiaku kryštálu a jeho axiálneho rezu.

V práci sme navrhli postup pre stanovenie pozície prstencov držiaku kryštálu založený na absorpcii nízkoenergetických fotónov. Bol použitý postup skenovania kolimovaným zväzkom gama fotónov ^{242}Am (59 keV) smerujúcim kolmo na os detektora pohybujúci sa v axiálnom smere detektora v smere od jeho čela. Za predpokladu, že hrúbka mŕtvej vrstvy germánia na bočnej (radiálnej) strane kryštálu, ako aj hrúbka ostatných absorbátorov, je konštantná, možno z odozvy detektora odhadnúť pozíciu prstencov. Výsledky analýzy zobrazuje **Obr. 4**. Ako vidieť na obrázku, namerané pozície prstencov sú v relatívne dobrej zhode s pozíciami prstencov uvedenými v dokumentácii výrobcu.



Obr. 3: Nákres merania pre odhad pozície prstencov držiaku kryštálu. Kolimátor sa pohyboval v smere šípky červenej šípky.



Obr. 4: Výsledky meraní pre zistenie pozície prstencov držiaku kryštálu spolu s vyznačenými nameranými rozmermi a rozmermi uvedenými v dokumentácii výrobcu.

Stanovenie rozmerov vnútorného otvoru kryštálu

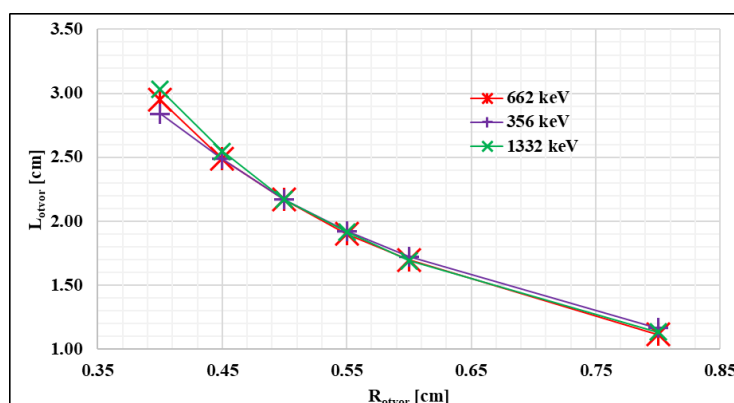
Koaxiálne detektory majú vnútorný otvor (tzv. „axial well“), ktorý slúži najmä pre optimalizáciu elektrického poľa v rámci objemu kryštálu, resp. optimalizáciu zberu nosičov náboja [4]. Informácie o veľkosti a presnom tvare vnútorného otvoru často nie sú dostupné. V takýchto prípadoch sa na stanovenie rozmerov vnútorného otvoru často využíva rádiografia. V práci sme navrhli postup na určenie rozmerov vnútorného otvoru kryštálu bez využitia rádiografie len na základe jednoduchých meraní. Cieľom bolo preveriť funkčnosť tejto metódy na reálnom detektore, pre ktorý sú rozmery otvoru známe.

Navrhovaná metóda je založená na porovnaní nameranej a vypočítanej účinnosti detektora. Metóda predpokladá, že sú známe všetky informácie o geometrii detektora s výnimkou rozmerov vnútorného otvoru kryštálu. V prvom kroku sa zostaví model detektora bez vnútorného otvoru kryštálu. Účinnosti

vypočítané z takéhoto modelu budú vyššie ako namerané, pretože objem detektora v modeli je väčší ako objem skutočného detektora. Preto treba dedefinovať otvor detektora (zmenšiť objem detektora) tak, aby sa detekčné účinnosti rovnali.

Teoreticky môže existovať nekonečné množstvo takých kombinácií dĺžky a priemeru otvoru, pre ktoré bude splnená podmienka rovnosti nameranej a vypočítanej účinnosti. Existujú dve limitné situácie. Otvor môže mať priemer rovný priemeru kryštálu a dĺžku, ktorá bude malá, čím príde ku skráteniu kryštálu. Druhým extrémom je, že dĺžka otvoru bude rovná dĺžke kryštálu a priemer otvoru bude malý. Hlavná myšlienka navrhovanej metódy odhadu rozmerov vnútorného otvoru kryštálu je založená na fakte, že zadefinovanie otvoru s konkrétnymi rozmermi bude mať rozdielny vplyv na účinnosť detekcie pre fotóny rôznych energií [5], [6]. Cieľom je preto zostrojiť závislosť polomeru (priemeru) otvoru od dĺžky otvoru, resp. dĺžky otvoru od polomeru otvoru tak, aby sa nameraná a vypočítaná účinnosť rovnali. Pri zostrojení týchto závislostí pre rôzne energie fotónov, resp. pre prislúchajúce účinnosti, by sa dané závislosti mali pretnúť v jednom bode, ktorý bude zodpovedať rozmerom otvoru v kryštáli.

Uvedený postup bol aplikovaný, ale zostrojené krivky sa nepretli. Príčinou bol pravdepodobne fakt, že niektoré z parametrov uvedené výrobcom nezodpovedajú realite, čo sa ukázalo najmä pri hrúbke mŕtvej vrstvy germánia. Bolo však pristúpené aspoň k teoretickému potvrdeniu navrhovaného postupu. Vypočítané účinnosti pre model detektora založený na technickej dokumentácii výrobcu sa prehlásili za namerané a hľadali sa možné kombinácie dĺžky a polomeru otvoru také, aby sa nameraná účinnosť (vypočítaná postulovaná za nameranú) a vypočítaná účinnosť rovnala. Závislosti pre rôzne kombinácie polomeru otvoru R_{otvor} a dĺžky otvoru L_{otvor} sa pre jednotlivé energie fotónov, resp. prislúchajúce účinnosti pretli **Obr. 5**.



Obr. 5: Možné kombinácie polomeru otvoru kryštálu R_{otvor} a jeho dĺžky L_{otvor} pri zachovaní konštantnej účinnosti pre detekciu fotónov rôznych energií.

Treba poznamenať, že dodatočné porovnanie technických výkresov viacerých detektorov ukazuje, že polomer vnútorného otvoru býva asi 0,5 cm a dĺžka otvoru býva porovnateľná, resp. mierne vyššia ako polovica dĺžky kryštálu (viď **Tab. 3**). Pri uvážení rozmerov kryštálu vyšetrovaného detektora a predchádzajúcich úvah je objem otvoru 1,40 cm³, pri uvážení skutočných rozmerov otvoru podľa dokumentácie výrobcu, je objem otvoru 1,69 cm³. Podľa [4], relatívna účinnosť detektora hodnoty 1 % zodpovedá 23 g germánia resp. 4,23 cm³. Potom pokles v relatívnej účinnosti detektora by mal byť na úrovni 0,32 % podľa odhadu z rozmerov kryštálu, resp. 0,40 % pri uvážení skutočných rozmerov kryštálu. Relatívny rozdiel (RR) vo výslednej účinnosti detektora pri uvážení poklesu účinnosti podľa odhadu a podľa dokumentácie výrobcu pri zohľadnení relatívnej účinnosti detektora 6,5 % je::

$$RR = 100 \times \frac{0,40 \% - 0,32 \%}{6,5 \%} = 1,23 \%$$

Uvedená hodnota je na úrovni neistoty stanovenia účinnosti z merania kalibračných štandardov. Podobné výsledky možno získať aj pre iné detektory (viď **Tab. 3**). Z uvedeného vyplýva, že pri odhadnutí veľkosti otvoru v kryštáli z rozmerov kryštálu sa do výsledku výpočtov vnesie minimálna chyba.

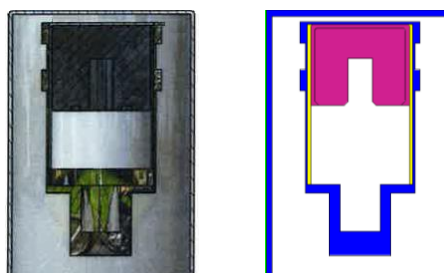
Tab. 3: Relatívny rozdiel (RR) vplyvu veľkosti otvoru v kryštáli na detekčnú účinnosť pri uvážení skutočných hodnôt rozmerov vnútorného otvoru a odhadnutých hodnôt zo skutočných rozmerov kryštálu ($R_{otvor} \approx 0,5 \text{ cm}$, $L_{otvor} \approx 0,5 \times L_{kryštál}$). Hodnoty sú spočítané vzhľadom na nominálnu relatívnu účinnosť (NRU) detektora.

Detektor	NRU [%]	Rozmery kryštálu $L_{kryštál}/R_{kryštál}$ [cm]	Rozmery otvoru L_{otvor}/R_{otvor} [cm]	RR [%]
GC 4018	40	5,90 / 3,13	4,20 / 0,50	0,58
GC 4018	40	6,15 / 3,03	3,60 / 0,45	0,08
GC 0518	5	3,70 / 2,20	2,00 / 0,50	0,6
GC 0518	5	3,53 / 2,02	2,15 / 0,50	1,60

Výsledky modelovania a diskusia

Rez konečným modelom detektora ako aj rez detektorom podľa dokumentácie výrobcu sú zobrazené na **Obr. 6**. Zostavovanie modelu detektora možno zhrnúť nasledovne:

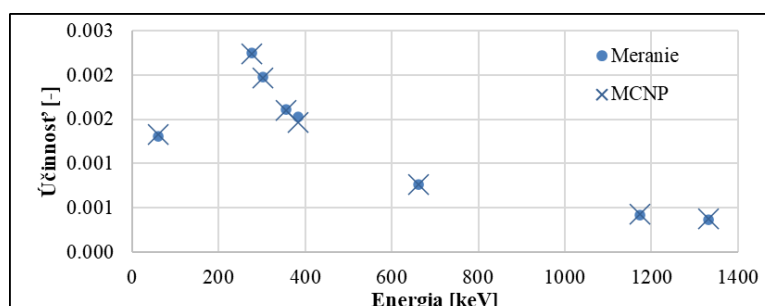
- V prvom kroku bola uvážaná geometria založená výlučne na technickej dokumentácii výrobcu. Na základe tej skutočnosti, že vypočítané účinnosti boli asi o 10 % vyššie ako namerané, bolo treba optimalizovať model.
- Kryštál bol v modeli skrátený zo spodnej strany o cca 2 mm z dôvodu prítomnosti vykrúžení v reálnom kryštáli (**Obr. 6** vľavo). Bohužiaľ, presná geometria vykrúžení nebola dostupná a preto nebola modelovaná.
- Keďže vykonané analýzy naznačovali, že hrúbka mŕtvej vrstvy germánia by mala byť hrubšia ako hrúbka uvedená v dokumentácii výrobcu, bola táto postupne zvyšovaná tak, aby vypočítané účinnosti pre všetky tri polohy bodových zdrojov boli porovnateľné s nameranými. Vyššie o cca 2 % – 3 % zostali len účinnosti pre energiu 59 keV. Pokles účinnosti pre túto nízkoenergetickú čiaru bol docielený dodefinovaním hrán, najprv na čelnej strane kryštálu, a následne aj na dolnej. Hrany boli definované ako kužeľovité plochy. Dodefinovanie hrán malo minimálny vplyv na účinnosti pre vyššie energie, keďže sa tým v podstate nezmenšil detekčne citlivý objem detektora. Malo to však požadovaný efekt pre pokles účinnosti pre fotóny energie 59 keV. V modeli bola nakoniec použitá hrúbka mŕtvej vrstvy germánia 1,35 mm, čo sa zhoduje z výsledkami merania mŕtvej vrstvy.



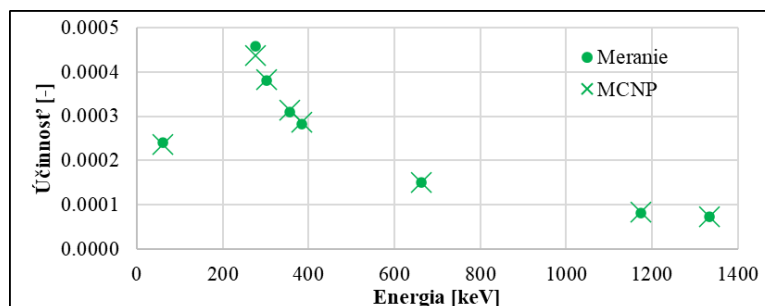
Obr. 6: Porovnanie geometrie detektora podľa dokumentácie výrobcu (vľavo) a MCNP modelu (vpravo).

Legenda: modrá - hliník, ružová - germánium, žltá - HDPE, biela - vákuum.

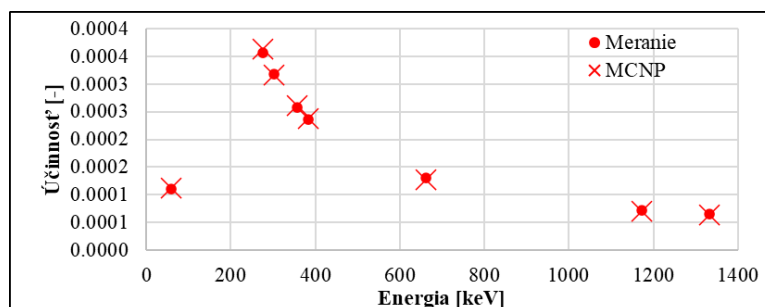
V nasledovných obrázkoch sú porovnané vypočítané a namerané detekčné účinnosti



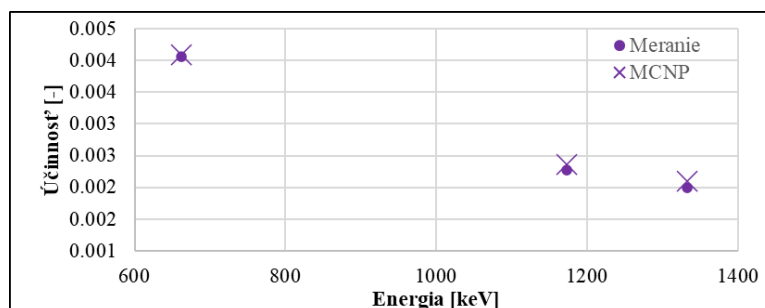
Obr. 7: Namerané a vypočítané píkovej účinnosti pre bodové zdroje merané na osi detektora vo vzdialenosti 10 cm od endcapu detektora.



Obr. 8: Namerané a vypočítané píkove účinnosti pre bodové zdroje merané na osi detektora vo vzdialenosti 25 cm od endcapu detektora.



Obr. 9: Namerané a vypočítané účinnosti pre bodové zdroje merané v rovine čela detektora vo vzdialenosti 25 cm od endcapu detektora.



Obr. 10: Namerané a vypočítané účinnosti pre Marinelliho nádoby.

Vo všeobecnosti možno prehlásiť, že namerané a vypočítané účinnosti pre všetky 4 uvažované geometrie, t.j. 3 polohy bodových zdrojov a geometria s Marinelliho nádobou vykazujú dobrú zhodu. Marinelliho nádoby síce vykazujú vyššiu neistotu, ale jedná sa o tesnú geometriu, tvar použitých kalibračných štandardov nie je dokonale cylindrický a hrúbka stien Marinelliho nádob nebýva dokonale presná (potvrdené prerezaním prázdnej nádoby).

4.2 Modelovanie detektorov s anorganickým scintilačným kryštálom

V nasledovnej tabuľke sú zosumarizované základné parametre modelovaných detektorov.

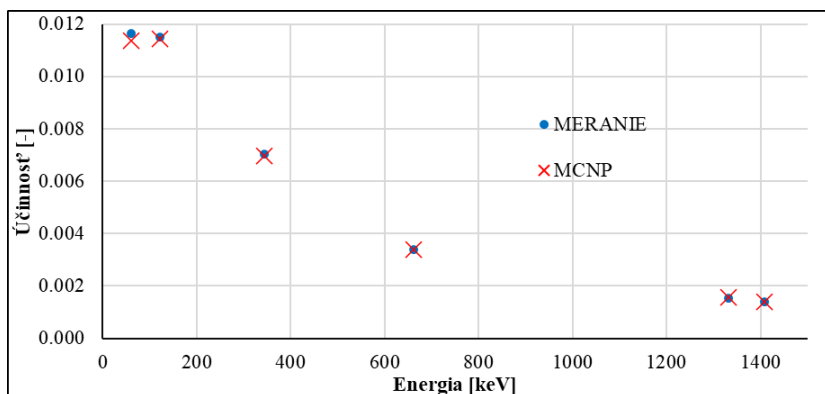
Tab. 4: Detektory uvažované v MCNP modeli [7], [8], [9].

Výrobca	Canberra	Saint Gobain
Typ	802-2X2	51S51/2
Kryštál	NaI:Tl	LaBr ₃ :Ce
Hustota scintilátora	3,67 g·cm ⁻³	5,29 g·cm ⁻³
Tvar kryštálu	Valec s rozmermi 2“ × 2“	

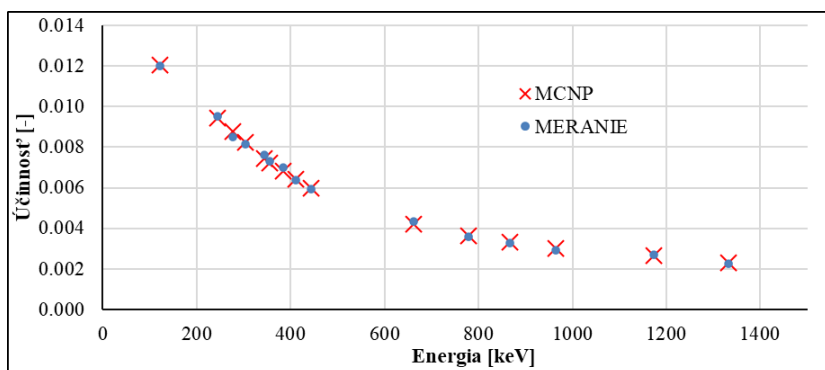
Pre validáciu modelov boli merané bodové kalibračné etalóny (⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹³³Ba, ¹⁵²Eu, ²⁴¹Am) vo vzdialenosti 10 cm od čela detektora na osi detektora v oceľovom tienení hrúbky 20 cm. Z meraní boli stanovené detekčné účinnosti (uvedené neskôr) a koeficienty funkcie energetického rozlíšenia

nasledovne: $a = 3,090 \times 10^{-3} \text{MeV}$, $b = 4,025 \times 10^{-2} \text{MeV}^{1/2}$ a $c = 6,880 \times 10^{-1} \text{MeV}^{-1}$ pre detektor NaI:Tl a $a = 4,688 \times 10^{-3} \text{MeV}$, $b = 1,658 \times 10^{-2} \text{MeV}^{1/2}$ a $c = 3,466 \times 10^{-1} \text{MeV}^{-1}$ pre detektor LaBr₃:Ce.

Modely detektorov boli zostavené na základe technických výkresov jednotlivých detektorov [7], [8], v podstate s minimálnymi odchýlkami. Vnútrná kontaminácia kryštálu LaBr₃:Ce nebola v modeli uvažovaná. Amerícium pre detektor LaBr₃:Ce nebolo uvažované, vzhľadom na pík vnútornej kontaminácie kryštálu v energii 37 keV. Nasledovné grafy zobrazujú namerané a vypočítané detekčné účinnosti. Ako vyplýva z grafov, namerané a vypočítané detekčné účinnosti sú v pomerne dobrej zhode.

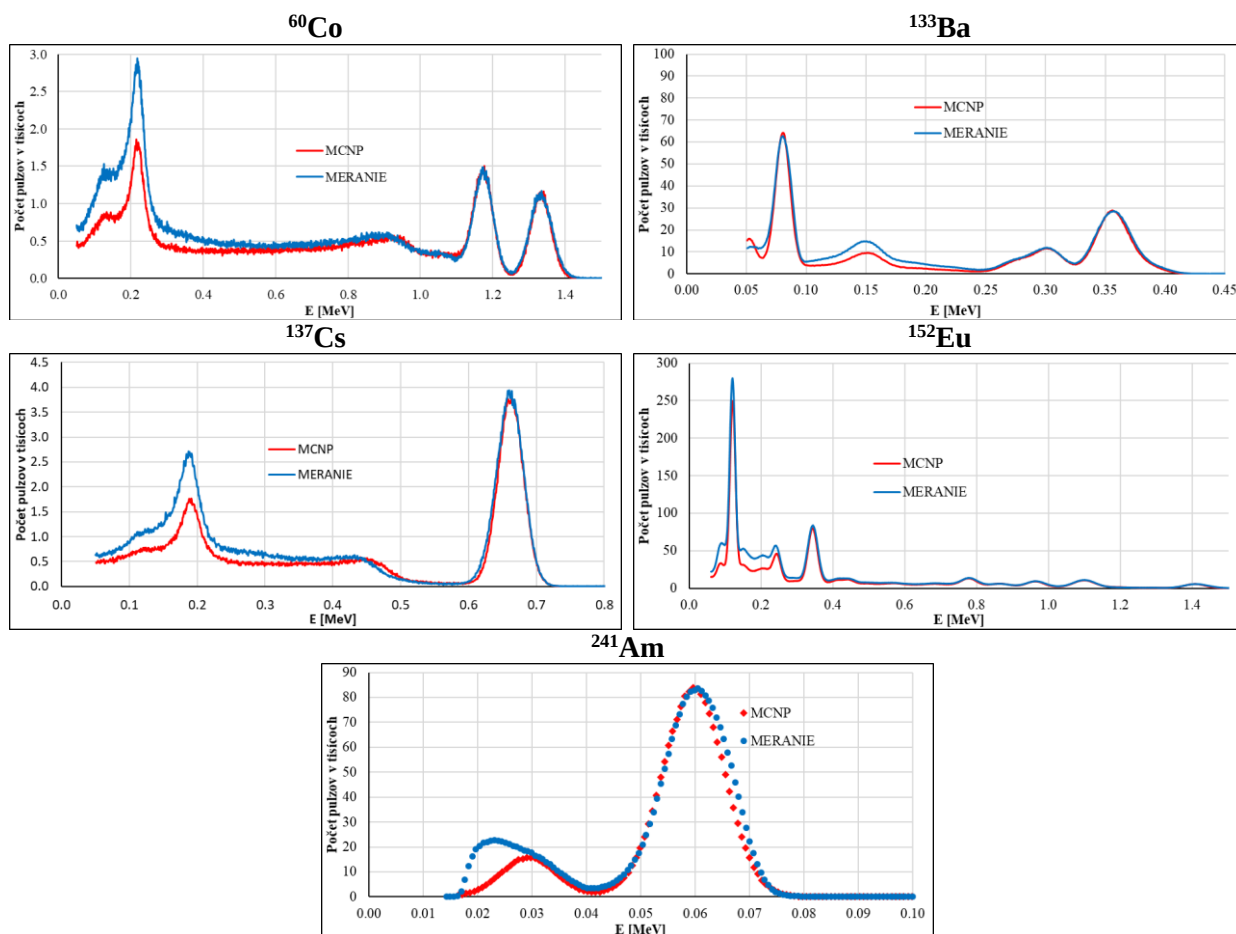


Obr. 11: Porovnanie nameraných a vypočítaných účinností pre detektor NaI:Tl.

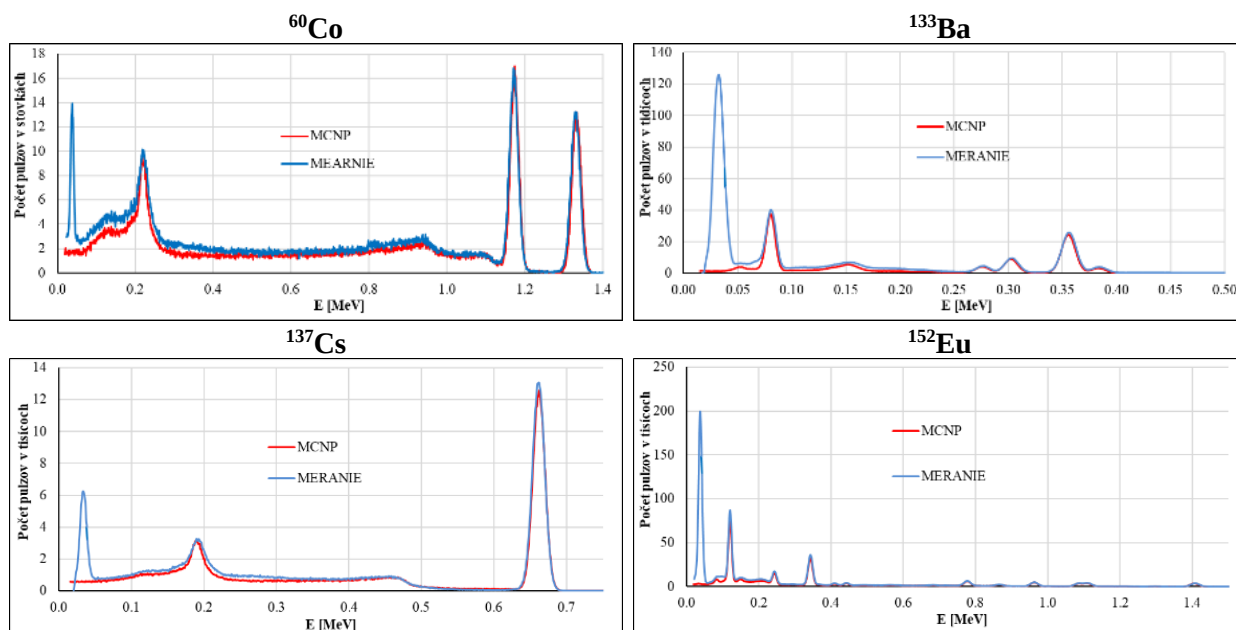


Obr. 12: Porovnanie nameraných a vypočítaných účinností pre detektor LaBr₃:Ce.

V nasledovných obrázkoch sú zobrazené namerané a vypočítané spektrá. V spektrách možno pozorovať výrazné píky spätného odrazu spôsobeného tienením nízkoopozadovej komory, v ktorej prebiehali merania. Na jednej strane sa tým obmedzil vplyv pozadia na meranie, na druhej strane sa to prejavilo v zásadnejších rozdieloch medzi nameranými a vypočítanými spektrami v oblasti Comptonovského pozadia a píku spätného odrazu v spektre. Rozdiely v spektrách boli spôsobené neistotami geometrického modelu okolia detektora. V nameraných spektrách pre detektor LaBr₃:Ce možno tiež pozorovať pík v energii cca 37 keV, ktorý je spôsobený vnútornou kontamináciou kryštálu. Vo vypočítaných spektrách uvedený pík nie je prítomný, pretože vo výpočtoch nebola vnútorná kontaminácia uvažovaná.



Obr. 13: Porovnanie nameraných a vypočítaných spektier pre detektor NaI:Tl.



Obr. 14: Porovnanie nameraných a vypočítaných spektier pre detektor LaBr₃:Ce.

4.3 Modelovanie plastového scintilačného detektora

Špecifikom plastových scintilačných detektorov je, že v spektre sa nenachádza pík úplnej absorpcie (Full Energy Peak – FEP) [10]. Spektrum má obvykle tvar klesajúcej funkcie s nevýrazným píkom (tzv. Comptonovo maximum – CM), ktorého energia je nižšia v porovnaní s teoretickou hodnotou Comptonovej hrany [11]. Jedná sa o nevýrazný pík, niekedy len o nevýraznú konkávnú oblasť v spektre.

Absencia píku úplnej absorpcie spôsobuje niekoľko komplikácií. Prvým problémom je, že nie je možné jednoducho vykonať energetickú kalibráciu nameraného spektra. Z pohľadu modelovania v MCNP

je problémom, že nie je možné stanoviť funkciu pre energetické rozlíšenie priamo z merania. Pre modelovanie, optimalizáciu modelu a jeho validáciu bol preto použitý prístup prezentovaný nižšie

V práci bol uvažovaný detektor, ktorého základné parametre sú uvedené v nasledovnej tabuľke.

Tab. 5: Parametre uvažovaného plastového scintilačného detektora.

Parameter	Hodnota
Výrobca	Nuvia Group
Typ	SPD 200.200.100
Tvar kryštálu	Kváder
Rozmery: šírka × výška × dĺžka	20 cm × 20 cm × 10 cm
Materiál	Polystyrén
Hustota	1,06 g cm ⁻³
Fotonásobič	2“ 14 pinový ET-Enterprises Ltd

Pre validačné merania boli použité bodové kalibračné zdroje (⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu), ktoré boli umiestnené kolmo na stred štvorcovej steny detektora vo vzdialenosti 25 cm.. Detektor bol počas merania umiestnený v oceľovej nízkoopozadovej tieniacej komore štandardne využívanej pre HPGe spektrometriu nízkych aktivít. Merací rozsah bol nastavený na 2048 kanálov tak, aby pri nezmenených hodnotách zosilnenia, napájacieho napätia a ostatných parametrov, mohli byť zmerané spektrá všetkých uvažovaných kalibračných zdrojov. Bola vykonaná korekcia na pozadie odčítaním spektra pozadia od spektra vzorky, podobne ako v [12] alebo [13].

Keďže nie je možné stanoviť funkciu energetického rozlíšenia z priameho merania, v prvom kroku sa pristúpilo k modelovaniu detektora bez uváženia energetického rozlíšenia. Následne sa hľadala fitovacia funkcia pre energetické rozlíšenie vo vypočítanom spektre a funkcia pre energetickú kalibráciu v nameraných spektrách tak, aby sa dosiahla dobrá zhoda medzi nameranými a vypočítanými spektrami. Pre energetické rozlíšenie sa uvažovala funkcia v tvare $FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2$, pre energetickú kalibráciu nameraného spektra sa uvažovala lineárna funkcia $E = KF \times CH$, kde KF je energetický kalibračný faktor a CH je číslo kanála v nameranom spektre. Aby bolo možné namerané aj vypočítané spektrá porovnať, boli prepočítané na jednotku aktivity. Keďže sa kanály nameraných a vypočítaných spektier vo všeobecnosti nemusia zhodovať s energetickými binmi (kanálmi) vypočítaných spektier, spektrá sa tiež prepočítali tak, že hodnoty prepočítané na jednotku aktivity sa ešte podelili energiou zodpovedajúcou šírke jedného kanálu v energetických jednotkách. Namerané a vypočítané spektrá potom vyjadrujú rovnakú distribučnú funkciu účinnosti na jednotku energie a je možné ich porovnávať.

Zohľadnenie energetického rozlíšenia vo vypočítaných spektrách (ktoré neuvažovali energetické rozlíšenie) sa vykonávalo mimo kódu MCNP podľa vzťahu (3), ktorý popisuje Gaussovo rozdelenie: Nech S_0 je počet udalostí v konkrétnom kanáli (energetickom bine) vypočítaného spektra medzi energiami E_1 a E_2 a nech E je energia zodpovedajúca stredu daného energetického binu. Nech σ je štandardná odchýlka zodpovedajúca energetickému rozlíšeniu pre danú energiu. Potom príspevok k počtu pulzov $M(E)$ v kanáli zodpovedajúcej energii E v spektre, ktorý bude zohľadňovať energetické rozlíšenie detektora sa vypočíta podľa vzťahu [14]:

$$\begin{aligned}
 M(E) &= S_0 \int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(E-E')^2}{2\sigma^2}\right] dE' = \\
 &= \frac{S_0}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{E_2-E}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{E_1-E}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

Štandardná odchýlka sa vypočíta z FWHM podľa vzťahu $FWHM = 2,35\sigma$.

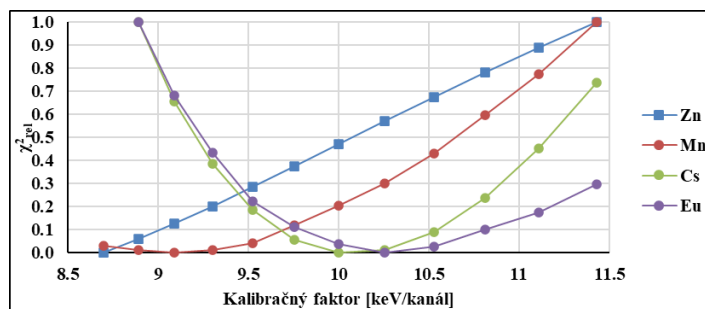
Pre prvotné odhadnutie hodnôt a , b , c a KF bola použitá metóda „pokus-omyl“, až kým sa nezískala približná optická zhoda medzi nameranými a vypočítanými spektrami. Samozrejme, boli tiež porovnané a vyskúšané hodnoty získané z rešerše publikovaných prác [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Ukázalo sa, že dobrá optická zhoda sa dosahuje pre hodnoty $a = 0$, $b > 0$ a $c = 0$. Pre parameter

$b \approx 1$ sa javila najlepšia zhoda. Matematicky potom možno (1) prepísať na tvar:

$$FWHM = b\sqrt{E} \quad (4)$$

Uvažovať takýto model bolo odporúčané aj po konzultácii s odborníkom z praxe, ktorý sa zaoberá problematikou MCNP výpočtov detektorov [22], podľa ktorého je parameter b je silne závislý na rozmeroch detektora a geometrii a je nevyhnutné ho optimalizovať.

V ďalších krokoch sa pristúpilo k optimalizácii modelu, konkrétne k optimalizácii parametra KF a parametra b . Aby sa výsledky mohli považovať za reprezentatívne, bolo tiež nutné kvantifikovať „dobrú zhodu“ medzi nameranými a vypočítanými spektrami. Bol preto zadefinovaný χ^2 test dobrej zhody [23] tak, aby namerané a vypočítané spektrá vykazovali dobrú zhodu pre energetický rozsah približne nad 250 keV. Prakticky sa optimalizácia a test vykonávali tak, že už odhadnutý parameter KF sa mierne modifikoval (zmenšoval a zväčšoval) a následne sa pre každú hodnotu kalibračného faktora hľadala optimálna hodnota parametra b tak, aby pre každú kombináciu vypočítaný vážený súčet druhých mocnín rozdielov medzi hodnotami v jednotlivých kanáloch nameraných a vypočítaných spektier dosahoval čo najnižšiu hodnotu. Na výpočet bol použitý program MS Excel s nástrojom Solver. Následne sa zostrojila závislosť týchto minimálnych hodnôt od kalibračného faktora KF (**Obr. 15**) a hľadalo sa jej minimum. Uvedený postup sa zopakoval pre všetky namerané spektrá s predpokladom, že pre každé namerané spektrum by sa mala získať identická (veľmi podobná) kombinácia hodnôt parametra b a KF . Výsledky sú uvedené nižšie.



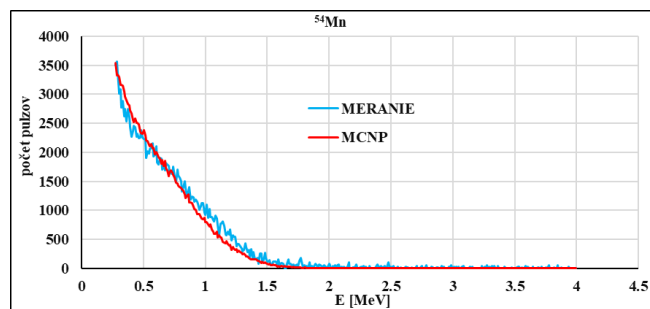
Obr. 15: Závislosti minimálnej hodnoty súčtu χ^2 od kalibračného faktora. Pre prehľadnosť obrázka sú hodnoty prenормované na interval $\langle 0; 1 \rangle$.

Ako vyplýva z **Obr. 15**, najlepšie zhody medzi nameranými a vypočítanými spektrami sa pre jednotlivé namerané spektrá dosiahli pre nasledovné hodnoty kalibračného faktora KF a prislúchajúceho parametra b :

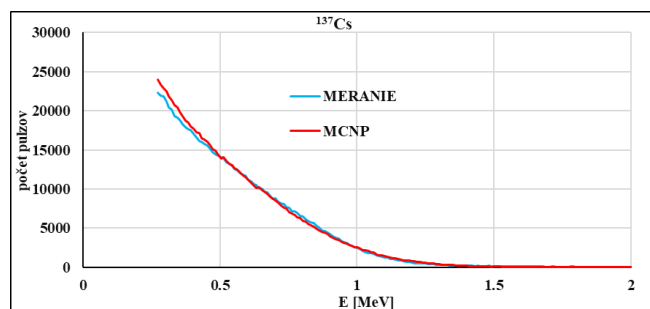
^{54}Mn	$KF = 9,091 \text{ keV/kanál}$	$b = 0,952 \text{ MEV}^{1/2}$
^{137}Cs	$KF = 10,000 \text{ keV/kanál}$	$b = 1,067 \text{ MEV}^{1/2}$
^{152}Eu	$KF = 10,256 \text{ keV/kanál}$	$b = 1,554 \text{ MEV}^{1/2}$

Pre ^{65}Zn sa nepodarilo nájsť minimálnu hodnotu χ^2 , čo môže byť dané nízkou aktivitou použitého žiariča (cca 100 Bq) a z toho vyplývajúcou zlou štatistikou merania (**Obr. 18**). Takisto treba zvážiť výsledky pre ^{152}Eu , keďže tu možno očakávať prítomnosť sumácií, čoho dôsledkom budú deformácie v spektre. Rádionuklid ^{60}Co nebol vyšetrovaný a je o ňom pojednané neskôr.

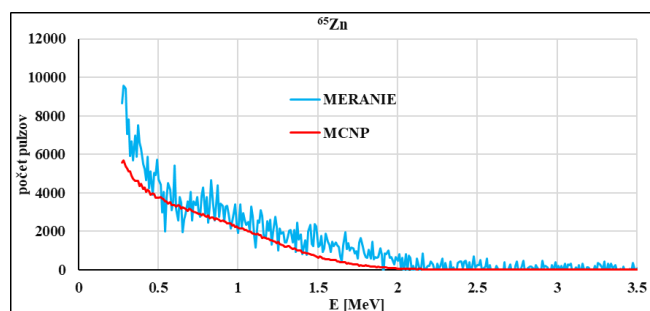
Nižšie sú zobrazené výsledné spektrá. Uvažované sú hodnoty kalibračného faktora KF a parametra b stanovené pre ^{137}Cs (**Obr. 15**) – jediný vyšetrovaný monoenergetický zdroj s dostatočne vysokou aktivitou. Vo výsledku možno povedať, že sa nám podarilo vytvoriť MCNP model veľkoobjemového plastového scintilačného detektora.



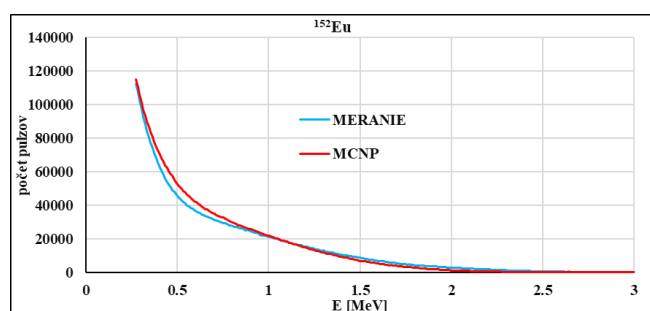
Obr. 16: Porovnanie nameraného a vypočítaného spektra pre bodový zdroj ^{54}Mn umiestnený vo vzdialenosti 25 cm kolmo od štvorcovej steny detektora.



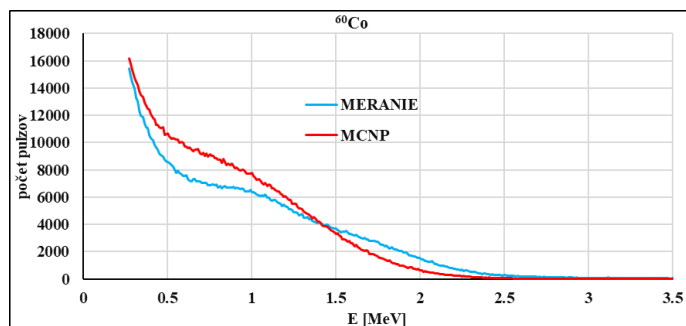
Obr. 17: Porovnanie nameraného a vypočítaného spektra pre bodový zdroj ^{137}Cs umiestnený vo vzdialenosti 25 cm kolmo od štvorcovej steny detektora.



Obr. 18: Porovnanie nameraného a vypočítaného spektra pre bodový zdroj ^{65}Zn umiestnený vo vzdialenosti 25 cm kolmo od štvorcovej steny detektora.



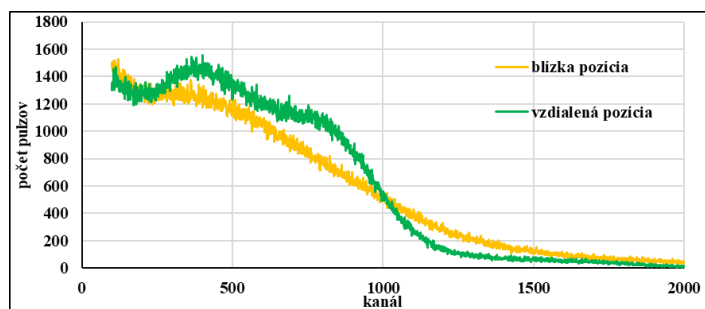
Obr. 19: Porovnanie nameraného a vypočítaného spektra pre bodový zdroj ^{152}Eu umiestnený vo vzdialenosti 25 cm kolmo od štvorcovej steny detektora.



Obr. 20: Porovnanie nameraného a vypočítaného spektra pre bodový zdroj ^{60}Co umiestnený vo vzdialenosti 25 cm kolmo od štvorcovej steny detektora.

Vyššie uvedené výsledky korelujú aj s prácami iných autorov, ktorí uvádzajú dobrú zhodu medzi nameranými a vypočítanými spektrami pre energie vyššie ako 250 – 500 keV, napr. [19], [24], [25], [26]. Práce väčšinou konštatujú, že spektrá majú dobrú zhodu v oblasti vyšších energií a rozdiely medzi nameranými a vypočítanými účinnosťami pri nízkych energiách bližšie nekomentujú [15]. V [25] je len stroho konštatované, že dobrá zhoda medzi vypočítanými a nameranými spektrami je od oblasti Comptonovej hrany až do energie tzv. „elektronického thresholdu“ pri energii 250 keV.

Rozdielnosti medzi nameranými a vypočítanými spektrami môžu byť spôsobené viacerými faktormi. Problémom môže byť, že v kóde MCNP nie je možné simulovať svetelné efekty. Už prvotné merania s detektorom ukazovali rozdielnosti v tvare spektra, najmä pre ^{60}Co , v závislosti na vzájomnej polohe detektora a zdroja. Boli preto vykonané dodatočné merania s kalibračným zdrojom ^{60}Co , kedy bol zdroj umiestnený priamo na detektor a to na osi detektora pri fotonásobiči a na protiľahlej strane. Je zrejmé, že vzhľadom na symetriu detektora by mali byť odozvy rovnaké. Namerané spektrá však rovnaké nie sú (**Obr. 21**). Efekt môže byť spôsobený odrazmi scintilačných fotónov a ich absorpciou na stenách scintilátora, resp. reflektore, alebo absorpciou produkovaného svetla v scintilátore pri prechode zo vzdialenejších častí scintilátora do fotonásobiča. V prípade rádionuklidu ^{60}Co taktiež treba uvažovať prítomnosť sumácií.



Obr. 21: Porovnanie nameraných spektier pre rôzne polohy zdroja ^{60}Co (bodový zdroj meraný kontaktne v rohoch detektora).

Deformácie v spektrách ako dôsledok svetelných efektov sú podrobne rozpracované v štúdiách [27] (detektor BC-408 a EJ-200 s rozmermi $12'' \times 15'' \times 2''$) alebo [12] (detektor s rozmermi $15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3,8 \text{ cm}$). Práce konštatujú, že čím je zdroj bližšie k fotonásobiču, tým nižšie sú v spektre početnosti pre nízke energie a tým vyššie sú v spektre početnosti pre vyššie energie, resp. čím je zdroj ďalej od fotonásobiča, tým vyššie početnosti sú pozorované pre nižšie energie a tým nižšie početnosti pre vyššie energie [27], [12]. podrobne porovnáva uvedené efekty pre spektrá ^{60}Co a ^{137}Cs pri rozdelení spektra na 3 – 4 energetické okná. Podľa [12], niektoré efekty v spektrách nie je možné adekvátne vysvetliť a je potrebné vykonať optické simulácie vo vhodnom výpočtovom kóde. Podľa predmetnej práce je MCNP model dobrý, len ak nás zaujíma meraný počet impulzov a nie je potrebné vykonávať analýzy založené na tvare spektra.

4.4 Optimalizácia meradla aktivity kvapalných výpustí

Pre optimalizáciu bolo vybrané meradlo aktivity kvapalných výpustí Berthold BAI 9125 [28], ktoré umožňuje kontinuálne meranie aktivity rádionuklidov emitujúcich žiarenie gama. Motiváciou práce bolo preveriť možnosti náhrady v meradle používaného detektora NaI:Tl detektorom s lepším energetickým rozlíšením. Nedostatočné energetické rozlíšenie detektora môže spôsobovať vznik falošných alarmov v dôsledku interferencie píkov vyšetřovaných nuklidov s píkmi prírodných rádionuklidov.

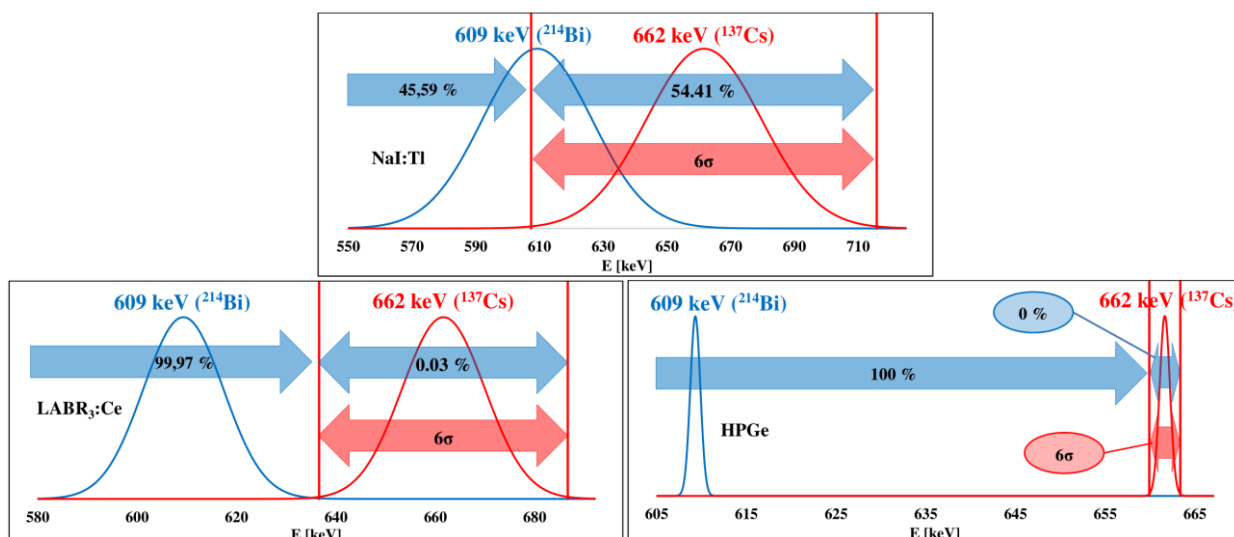
Konštrukčné prevedenie meradla BAI 9125 je znázornené na **Obr. 23** vľavo. Meradlo je konštruované ako veľká Marinelliho nádoba z nehrdzavejúcej ocele s objemom 25 litrov, cez ktorú kontinuálne prúdi meraná kvapalina. Z hornej strany je do nádoby umiestnená plastová trubková vložka, do ktorej je vložený 2“×3“ NaI:Tl detektor. Celé meradlo je tienené 5 cm hrubou vrstvou olova, z hornej strany je hrúbka tienenia 10 cm. Pre vyhodnocovanie meraní sú v meradle nainštalované 2 jednonábové analyzátory umožňujúce vyhodnocovanie meraní z detegovanej početnosti pre 2 zadefinované energetické okná alebo jedno energetické okno a integrálny režim („total gama“: 50 – 1700 keV) [28]. Energetické okno býva nastavené podľa tzv. pravidla 6σ , kedy nastavené okno pokrýva 99,7 % plochy píku úplnej absorpcie. Uvedené meradlo sa využíva na kontinuálne meranie aktivity odpadovej vody vypúšťanej z areálu jadrovej elektrárne, kde býva nainštalované na obtoku vypúšťacieho náboja. Cez vypúšťací náboj je, o.i., z areálu JE vypúšťaná aj dažďová voda. Problémom je, že počas dažďa môžu byť prírodné rádionuklidy nachádzajúce sa v atmosfére „spláchnuté“, čo môže viesť k dočasnému zvýšeniu ich koncentrácie vo vypúšťanej vode a prekročeniu vyšetřovacej úrovně (8 Bq/l) alebo limitnej hodnoty objemovej aktivity (40 Bq/l) [29].

Pre možnú prítomnosť rôznych rádionuklidov vo vypúšťanej vode je vhodné pokryť jedným analyzátorom celý energetický rozsah meradla v režime total gama a druhým vybrané energetické okno. V JE sa obvyčajne meria ^{137}Cs . Pri uvážení pravidla 6σ a energetického rozlíšenia detektora NaI:Tl udaného výrobcom meradla ($\text{FWHM} = 8\%$ pre energetickú čiaru 662 keV pričom $\text{FWHM} = 2,3548\sigma$), je energetické okno 596-728 keV. Problémom je, že do takto nastaveného energetického náboja sú započítavané aj pulzy spôsobené fotónmi 609 keV emitované rádionuklidom ^{214}Bi , ktorý je spolu s rádionuklidom ^{214}Pb najvýznamnejším zdrojom žiarenia gama rozpadového náboja uránu ^{238}U . Jednou z možností ako túto interferenciu eliminovať, je nahradiť detektor NaI:Tl detektorom s lepším energetickým rozlíšením.

Nižšie je porovnané použitie scintilačných detektorov NaI:Tl, $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ a polovodičového HPGe detektora. Výmena detektora NaI:Tl za detektor s lepším energetickým rozlíšením však povedie aj k zmene ďalších metrologických parametrov, najmä účinnosti detekcie a detekčného limitu. Detektor $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ má pri nezmenenom detekčnom objeme kryštálu vyššiu účinnosť a lepšie energetické rozlíšenie. Na druhú stranu, vnútorná kontaminácia spôsobí vyššiu detegovanú početnosť a tým aj zvýšenie detekčného limitu. Detektor HPGe má z uvedených detektorov najlepšie energetické rozlíšenie, ale má nižšiu detekčnú účinnosť, čo bude mať negatívny vplyv na čas merania.

Porovnanie energetického rozlíšenia

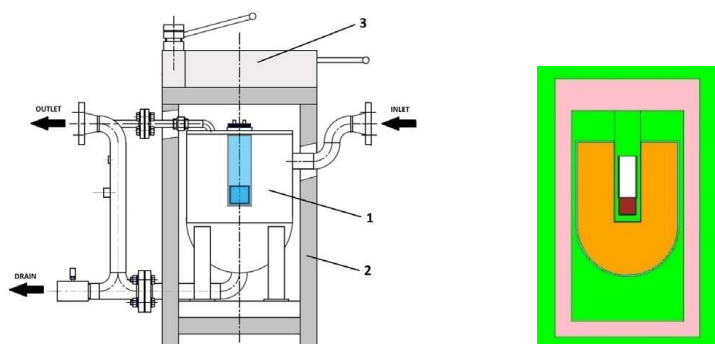
Porovnanie vplyvu energetického rozlíšenia na interferenciu píku 609 keV ^{214}Bi s píkcom 662 keV ^{137}Cs je vykonané pre detektory NaI:Tl, $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ a HPGe, ktoré boli v tejto práci modelované. Z porovnania vyplýva, že zatiaľ čo pri detektore NaI:Tl sa s píkcom 662 keV ^{137}Cs prekrýva takmer 55 % plochy píku 609 keV ^{214}Bi , pri detektore $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ to je len 0,03 % plochy a pri detektore HPGe je to v podstate 0 %. Z porovnania jednoznačne vyplýva, že nahradením detektora NaI:Tl detektormi $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ alebo HPGe je možné dostatočne obmedziť interferenciu píkov 609 keV ^{214}Bi a 662 keV ^{137}Cs .



Obr. 22: Percentuálne vyjadrenie interferencie píku úplnej absorpcie 609 keV ^{214}Bi s píkom 662 keV ^{137}Cs na úrovni 6σ pre detektory NaI:Tl, LaBr₃:Ce a HPGe.

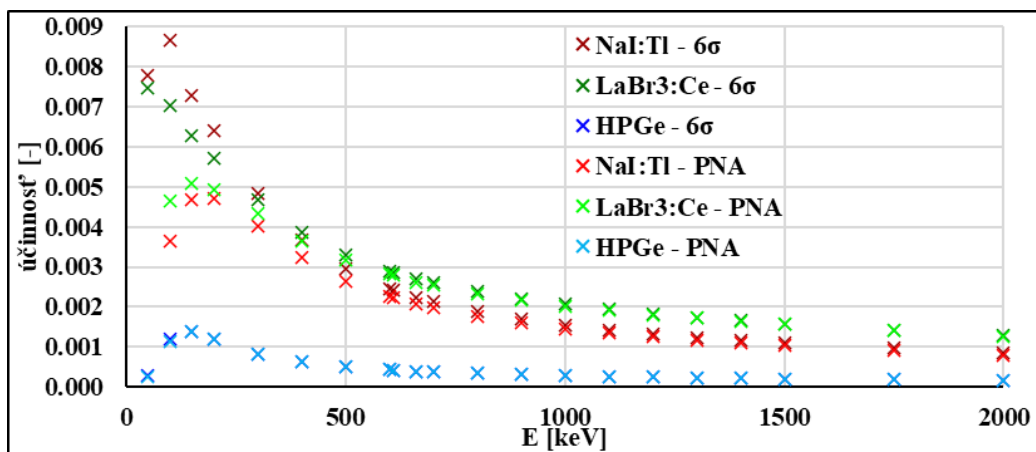
Porovnanie detekčnej účinnosti

Detekčná účinnosť meradla bola vypočítaná v kóde MCNP. Model meradla bol zostavený na základe technickej dokumentácie výrobcu meradla BAI 9125 [28] s uvažovaním v tejto práci modelovaných detektorov. Rez modelom meradla je na **Obr. 23** vpravo. V prvom kroku boli vypočítané píkove detekčné účinnosti pre celý energetický rozsah meradla. V druhom kroku boli vypočítané kalibračné faktory pre ^{137}Cs , ktoré sú potrebné pre výpočet detekčných limitov.



Obr. 23: Rez meradlom kvapalných výpusťí BAI9125 [28] (vľavo) a rez jeho MCNP modelom (vpravo).

Detekčné účinnosti boli počítané tak, aby neistota výsledku bola vždy nižšia ako 1 %. Podľa dokumentácie výrobcu meradla kvapalných výpusťí BAI 9125 sú v meracom systéme používané dva jednakanálové analyzátory. Tieto by však bolo možné nahradiť mnohokanálovými analyzátormi a pre vyhodnocovanie nevyužívať energetické okná ale metódu PNA. Metóda PNA môže byť výhodná napr. z pohľadu eliminácie už spomenutých falošných alarmov pri prekrývajúcich sa píkoch alebo prítomnosti výrazného Comptonovského kontinua pod píkom. Preto sú detekčné účinnosti vypočítané ako pre energetické okná, tak aj pre metódu PNA, kde plochy pod píkmami boli z vypočítaných spektier stanovované v programe InterSpec. Výsledky sú uvedené v nasledovných tabuľkách. Neistoty pre prehľadnosť nie sú uvedené.



Obr. 24: Porovnanie detekčných účinností meradla kvapalných výpustí pre scintilačné detektory 2“×2“ NaI:Tl, 2“×2“ LaBr₃:Ce a HPGe detektor GC0518 pri použití metódy PNA a pri uvažovaní energetického okna na úrovni 6σ.

Vypočítané detekčné účinnosti potvrdzujú, že najvyššia účinnosť je dosahovaná pre detektor LaBr₃:Ce. Pre detektor HPGe je účinnosť, vzhľadom na veľkosť kryštálu (relatívna účinnosť 5 %) najnižšia. Možno ju však bez problémov kompenzovať použitím väčšieho kryštálu. Vo vypočítaných detekčných účinnostiach možno pozorovať rozdielnosti pri použití metódy PNA a pri uvažovaní energetického okna, najmä pre nižšie energie. Je to dané najmä vplyvom detekcie udalostí, ktoré zodpovedajú Comptonovským fotónom od tienenia a samotnej meranej kvapaliny, keď sa uvažuje energetické okno 6σ. Tieto udalosti v prípade metódy PNA nie sú vo výsledku obsiahnuté.

V praxi sa v meradlách pri výpočte aktivity používa namiesto detekčnej účinnosti kalibračný faktor, ktorý možno interpretovať ako prevrátenú hodnotu citlivosti. Tvar kalibračného faktora je taký, aby sa jeho súčinom s nameranou početnosťou získal výsledok v požadovanom tvare. Pre meradlo kvapalných výpustí možno kalibračný faktor F_V vypočítat nasledovne:

$$F_V = \frac{1}{\varepsilon \times \gamma \times V} \quad (5)$$

kde ε je detekčná účinnosť, γ počet fotónov s danou energiou emitovaných na jednu rádioaktívnu premenu a V je merací objem. Jednotkou kalibračného faktora F_V je $Bq \text{ s m}^{-3}$. V Tab. 6 sú uvedené detekčné účinnosti a kalibračné faktory pre ^{137}Cs (meraný objem 25 litrov, počet fotónov emitovaných na jednotku aktivity je prevzatý z [30]).

Tab. 6: Porovnanie detekčných účinností a kalibračných faktorov pre rádionuklid ^{137}Cs meradla kvapalných výpustí pre jednotlivé detektory pri použití metódy PNA a pri uvažovaní energetického okna na úrovni 6σ.

	Účinnosť [-]	Neistota účinnosti [%]	Kalibračný faktor [kBq s m ⁻³]	Neistota kalibračného faktora [%]
NaI:Tl - PNA	$2,080 \times 10^{-3}$	0,24	22,604	0,34
NaI:Tl - 6σ	$2,234 \times 10^{-3}$	0,21	21,042	0,32
LaBr ₃ :Ce - PNA	$2,623 \times 10^{-3}$	0,19	17,921	0,31
LaBr ₃ :Ce - 6σ	$2,715 \times 10^{-3}$	0,21	17,313	0,32
HPGe - PNA	$3,896 \times 10^{-4}$	0,52	120,649	0,58
HPGe - 6σ	$4,057 \times 10^{-4}$	0,51	115,870	0,57

Porovnanie detekčných limitov

Na detekčný limit (LD) má zásadný vplyv účinnosť detekcie, úroveň pozadia a čas merania. Pre následný výpočet minimálnej detekovateľnej aktivity (MDA) pre dané meradlo je nevyhnutné stanoviť odozvu meradla na pozadie. Pre potreby tejto práce je MDA odhadnutá z meraní s rôznymi tieneniami. V reálnych podmienkach sú v meradle 2 významné tieniace materiály. Olovené tienenie hrúbky 5 cm, resp. 10 cm a samotná meraná kvapalina, t.j. voda. Pre odhad MDA boli vykonané 3 sady meraní s detektormi v rôznych tieneniach: meranie pozadia s detektorom v nízkoopozadovej ocelej komore s hrúbkou steny 20 cm, v olovenom tienení hrúbky 3,5 cm a na záver aj so samotným holým detektorom. V prípade HPGe detektora bolo vykonané len meranie s holým detektorom, keďže rozmernosť uvažovaného detektora ho neumožňovala umiestniť do nízkoopozadovej komory ani oloveného tienenia.

Detekčný limit je počítaný podľa vzťahu, ktorý udáva výrobca meradla BAI1925 v manuáli [28]:

$$L_D = 2k\sqrt{2} \sigma_0 \frac{1}{t} = 2 \times 1,645 \times \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{R_0}{t}} \quad (6)$$

kde R_0 je nameraná početnosť vo vyšetrovanom energetickom okne a t je čas merania. Pri zohľadnení kalibračného faktora možno pre minimálnu detekovateľnú aktivitu MDA zapísať nasledovný vzťah:

$$MDA = 4,653 \times \sqrt{\frac{R_0}{t}} \times \frac{1}{\varepsilon \times \gamma \times V} = 4,653 \times \sqrt{\frac{R_0}{t}} \times F_V \quad (7)$$

Hodnoty MDA boli vypočítané pre jednotlivé energetické okná pre obvyklé časy merania 0,5 hod resp. 1 hod. Hodnoty boli vypočítané z nameranej početnosti z niekoľkohodinových meraní. Cieľom bolo najmä zistiť, či použitie detektora LaBr₃:Ce zásadným spôsobom nezvýši detekčný limit. Ukazuje sa, že pre detektor LaBr₃:Ce v prípade použitia tienenia sú odhadované hodnoty MDA vyššie v porovnaní detektorom NaI:Tl. V prípade netieneného detektora je mierne vyššia hodnota MDA pre detektor NaI:Tl, čo je však dané širším energetickým oknom a tým aj vyššou meranou početnosťou z merania pozadia. Preukázalo sa však, že MDA sú vo všetkých uvažovaných prípadoch dostatočne hlboko pod uvoľňovacími úrovňami.

Tab. 7: Vypočítané detekčné limity LD a minimálne detekovateľné aktivity MDA pre rádionuklid ¹³⁷Cs pre rôzne tienenia detektorov (100 nSv h⁻¹). Pre porovnanie sú uvedené aj hodnoty MDA vypočítané podľa dát výrobcu meradla BAI 9125.

Detektor	NaI:Tl			LaBr ₃ :Ce			HPGe	Meradlo BAI 9125
Tienenie	ocel' 20 cm	olovo 2.8 cm	-	ocel' 20 cm	olovo 2.8 cm	-	-	
Energetické okno [keV]	607,4-715,9			636,6-686,7			659,9-663,4	596-728
Nameraná početnosť [s ⁻¹]	0,0484	0,7701	2,6866	1,8247	2,3227	3,2618	0,0509	0,20
Kalibračný faktor [kBq s m ⁻³]	21,01			17,29			115,72	14,40
MDA (0,5 hod) [kBq m ⁻³]	0,507	2,022	3,777	2,561	2,890	3,425	2,863	0,706
MDA (1 hod) [kBq m ⁻³]	0,359	1,430	2,671	1,811	2,044	2,422	2,024	0,499

5 Dosiahnuté výsledky a prínosy pre rozvoj vednej disciplíny

Predkladaná dizertačná práca sa venuje problematike detektorov a meradiel aktivity pre prevádzku a vyradovanie JE založených na detekcii žiarenia gama. Najvýznamnejšie závery práce a prínos pre vednú disciplínu možno zhrnúť do niekoľkých bodov.

1) Zostavenie podrobného prehľadu meradiel aktivity pre prevádzku a vyradovanie jadrových zariadení v kontexte legislatívnych požiadaviek, normatívnych požiadaviek a požiadaviek praxe

V prvých, teoretických, častiach práce sú popísané legislatívne požiadavky pre uvoľňovanie materiálov do životného prostredia a nakladanie s RAO a s tým súvisiace legislatívne a normatívne požiadavky kladené na meradlá aktivity využívané počas prevádzky a vyradovania jadrových zariadení. Ďalej sú tiež podrobne rozpracované základné charakteristiky meradiel z pohľadu legislatívnych a normatívnych požiadaviek, ako aj požiadaviek praxe. Samostatná časť práce sa podrobne venuje v meradlách najčastejšie využívaným detektorom – detektorom s anorganickým scintilačným kryštálom, HPGe detektorom a plastovým scintilačným detektorom. Teoretická časť je uzavretá systematizáciou najčastejšie využívaných meradiel spolu s uvedením ich typických charakteristík.

2) Zostavenie modelov detektorov používaných v meradlách aktivity pre nakladanie s RAO a uvoľňovanie materiálov do ŽP

Praktická časť práce sa zaoberá modelovaním detektorov a meradiel vo výpočtovom kóde MCNP5. Boli zostavené a optimalizované modely v meradlách najčastejšie využívaných detektorov. Pre modelovanie boli vybrané nasledovné detektory:

- HPGe detektor **GC0518** (*Mirion*)
- NaI:Tl scintilačný detektor **802-2X2** (*Canberra*)
- LaBr₃:Ce scintilačný detektor **51S51/2** (*Saint Gobain*)
- Plastový scintilačný detektor **SPD 200.100.100** (*Nuvia*)

Modely jednotlivých detektorov boli zostavené na základe dostupnej technickej dokumentácie výrobcov so zreteľom na už publikované práce iných autorov. Bola tiež vykonaná optimalizácia jednotlivých modelov na základe validačných meraní s kalibračnými štandardmi a taktiež na základe dodatočných analýz. Optimalizácia a analýzy sú pre jednotlivé skupiny detektorov popísané v samostatných bodoch.

Modelovanie detektora s anorganickým scintilačným kryštálom

Modely anorganických scintilačných detektorov boli zostavené na základe technickej dokumentácie výrobcov a dostupnej literatúry. Niektoré rozmery boli mierne modifikované v rámci tolerancií uvedených v technických výkresoch (najmä hrúbka reflektora a hliníkového puzdra). Relatívne odchýlky medzi nameranými a vypočítanými hodnotami detekčných účinností sú na úrovni 1-2 %, pričom najvyššia hodnota pre detektor NaI:Tl je 3,06 % a pre detektor LaBr₃:Ce 2,48 %. V prípade detektora LaBr₃:Ce nebola v modeli uvažovaná vnútorná kontaminácia kryštálu.

Modelovanie HPGe detektora a návrh postupov pre stanovenie vybraných geometrických parametrov detektora

V práci bol modelovaný koaxiálny detektor GC0518 (relatívna účinnosť 5 %, FWHM (1332 keV) 1,8 keV). K detektoru bola dostupná technická dokumentácia výrobcu s niektorými geometrickými parametrami.

Prvotný model HPGe detektora zostavený výlučne podľa dokumentácie výrobcu vykazoval neuspokojivé výsledky, pretože vypočítané detekčné účinnosti boli približne o 10 % vyššie ako namerané. Optimalizáciou modelu vyšetrovaného detektora (najmä zväčšením hrúbky mŕtvej vrstvy, sa podarilo dosiahnuť, že rozdiely medzi nameranými a vypočítanými detekčnými účinnosťami sú pre bodové zdroje (merania v 3 pozíciách) na úrovni 1 % - 2 %, v dvoch prípadoch sú hodnoty vyššie (4,52 % a 4,19 %). Maximálny rozdiel pre Marinelliho nádoby bol 5,38 %, kde však treba brať do úvahy blízku geometriu a

nepresnosť v tvare Marinelliho nádob používaných výrobcom kalibračných zdrojov (potvrdené prerezaním prázdnej nádoby).

Predpokladom modelovania detektorov s HPGe kryštálom je dobrá znalosť geometrie detektora ako celku. Je nevyhnutné poznať viaceré geometrické parametre ako rozmery kryštálu, rozmery vnútorného otvoru kryštálu, zaoblenia hrán, hrúbka mŕtvej vrstvy, tvar a rozmery držiaka kryštálu, hrúbka viečka („endcap“), presná pozícia kryštálu pod viečkom a pod. Výrobcovia detektorov však často tieto informácie neposkytujú alebo uvádzajú len nominálne parametre. Často je preto potrebné niektoré parametre optimalizovať alebo stanoviť na základe dodatočných analýz.

Pre optimalizáciu modelu v tejto práci uvažovaného HPGe detektora bolo vykonaných niekoľko analýz. Okrem optimalizácie modelu detektora bolo však cieľom práce aj overiť, či je možné stanoviť niektoré geometrické parametre detektora bez potreby využitia rádiografie a porovnať takto stanovené parametre s technickou dokumentáciou. To by umožňovalo modelovať detektory aj v prípade, kedy výrobca niektoré informácie o geometrii neposkytuje.

Hrúbka mŕtvej vrstvy germánia na povrchu kryštálu bola stanovená meraním kolimovaného zväzku 59 keV fotónov ^{241}Am . Pre stanovenie hrúbky mŕtvej vrstvy sme odvodili všeobecný vzťah, ktorý je založený na predpoklade, že pri dopade úzkeho kolimovaného zväzku relatívne nízko energetických fotónov je časť fotónov absorbovaná v mŕtvej vrstve germánia a časť je detegovaná detekčne citlivou časťou kryštálu. Z meraní fotónov dopadajúcich pod rôznymi uhlami, konkrétne z detegovaných početností, je následne možné stanoviť hrúbku mŕtvej vrstvy. Takto bola stanovená hrúbka mŕtvej vrstvy v rozmedzí 1,279 mm – 1,362 mm, pričom hodnota uvedená výrobcom je iba 1,2 mm. Tomu, že výrobca uvádza tenšiu mŕtvu vrstvu nasvedčoval aj fakt, že model zostavený na základe dokumentácie výrobcu poskytoval hodnoty detekčných účinností o cca 10 % vyššie v porovnaní s meraním. Vo finálnom modeli bola použitá hrúbka 1,35 mm.

Tvar držiaku kryštálu („holder“ alebo „mounting cup“) detektorov Canberra / Mirion má špecifický tvar. Pre stanovenie tvaru držiaku sme navrhli postup založený na meraní kolimovaného zväzku nízkoenergetických fotónov, ktorý dopadá v rôznych polohách detektora v radiálnom smere kolmo na os detektora. Ako zdroj fotónov bol použitý rádionuklid ^{241}Am emitujúci fotóny s energiou 59 keV. Stanovený tvar bol v dobrej zhode s dokumentáciou výrobcu.

Rozmery vnútorného otvoru kryštálu („axial-well“) často nie sú v dokumentácii výrobcu uvedené. Navrhli sme metódu pre odhad rozmerov vnútorného otvoru, ktorú sa podarilo overiť len teoreticky. Porovnaním rozmerov vnútorného otvoru kryštálu pre rôzne detektory sa však ukázalo, že v prípade nedostupnosti týchto rozmerov je vhodné uvažovať priemer vnútorného otvoru 1 cm a dĺžku rovnú polovici dĺžky kryštálu.

Modelovanie veľkoobjemového plastového scintilačného detektora

Modelovanie veľkoobjemového plastového scintilačného detektora bolo relatívne komplikované, pretože v nameranom spektre sa nenachádza pik úplnej absorpcie. Dôsledkom toho sú problémy spojené s energetickou kalibráciou, stanovením energetického rozlíšenia a nemožnosťou využívania píkových detekčných účinností. Pri validovaní MCNP modelu detektora bolo preto možné porovnávať len celkovú detekčnú účinnosť a tvar spektra.

Bohužiaľ, kód MCNP počíta len energiu fotónu odovzdanú detekčne citlivému objemu detektora. Aby bolo bol tvar vypočítaného spektra porovnateľný s nameraným spektrom, je nevyhnutné uvážiť efekty spôsobujúce energetické rozlíšenie (štatistické fluktuácie šírenia a zberu scintilačných fotónov, šumu elektrických komponentov spektrometrickej trasy a pod). Tieto efekty nie je možné v kóde MCNP uvažovať, ale je ich možné dodefinovať cez kartu GEB na základe stanovenia parametrov fitovacej funkcie implementovanej v kóde MCNP. Parametre tejto funkcie sa štandardne stanovujú z priameho merania energetického rozlíšenia z píkov úplnej absorpcie. Použitie tohto postupu nie je v prípade plastového scintilačného detektora možné, preto bol navrhnutý a použitý nasledovný postup.

Pre energetickú kalibráciu bola zvolená lineárna funkcia. Energetická kalibrácia nameraných spektier ako aj stanovenie funkcie energetického rozlíšenia boli vykonané tak, že pre rôzne hodnoty

kalibračného faktora boli použitím testu χ^2 hľadané optimálne parametre funkcie energetického rozlíšenia také, aby tvar nameraného a vypočítaného spektra vykazoval čo najlepšiu zhodu. Následne sa hľadalo minimum funkcie χ^2 v závislosti od kalibračného faktora. Zodpovedajúci kalibračný faktor sa použil pre kalibráciu nameraných spektier a zodpovedajúca funkcia energetického rozlíšenia sa použila pre vypočítané spektrá. Potvrdilo sa tiež, že najvhodnejšou funkciou pre energetické rozlíšenie je tvar $FWHM = b \times \sqrt{E}$ kde b je konštanta a E je energia v MeV, pričom hodnota b bola stanovená ako 0,98 pre vyšetrovaný detektor.

Vypočítané a namerané spektrá vykazujú pomerne dobrú zhodu. Bohužiaľ, z meraní kalibračných štandardov sa ukázalo, že na tvar spektier majú zásadný vplyv svetelné efekty prebiehajúce v detektore, ktoré v MCNP nie je možné modelovať. Vplyv na tvar spektier možno pozorovať z meraní kalibračných štandardov v rovnakých pozíciách vzhľadom na osi symetrie detektora, ale rozdielných vzhľadom na pozíciu fotonásobiča. Preto by bolo v budúcnosti vhodnejšie použiť výpočtový kód umožňujúci modelovanie svetelných efektov.

3) Optimalizácia meradla kvapalných výpustí.

V poslednej časti práce bola vykonaná optimalizácia meradla kvapalných výpustí. Cieľom bolo preveriť možnosti náhrady detektora NaI:Tl v meradle kvapalných výpustí detektorom s lepším energetickým rozlíšením a tým obmedziť vznik falošných alarmov, ktoré vznikajú interferenciou píku 609 keV ^{214}Bi s píkom 662 keV ^{137}Cs . Porovnania energetického rozlíšenia detektora NaI:Tl s detektorom LaBr₃:Ce a HPGe ukazujú, že interferencia pre LaBr₃:Ce je na úrovni 0,03 % a pre HPGe je interferencia úplne zanedbateľná. Náhrada detektora NaI:Tl však povedie aj k zmene detekčných účinností a detekčných limitov. Z pohľadu detekčnej účinnosti dôjde v prípade použitia detektora LaBr₃:Ce k jej zvýšeniu, v prípade použitia detektora HPGe k zníženiu, keďže detekčná účinnosť na jednotku objemu je pre HPGe detektor vo všeobecnosti nižšia. Z pohľadu zmeny detekčných limitov treba uvažovať najmä fakt, že vnútorná aktivita kryštálu LaBr₃:Ce bude mať negatívny vplyv na detekčný limit kvôli vyššej detegovanej početnosti, pre uvedený detektor. Vo všetkých prípadoch však bude detekčný limit dostatočne nízky v porovnaní s uvoľňovacími úrovňami. Možno preto konštatovať, že výmena detektora NaI:Tl za detektor s lepšími spektrometrickými vlastnosťami je vhodná pre elimináciu falošných alarmov.

6 Zoznam použitej literatúry

- [1] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [2] X-5 Monte Carlo Team. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume II: User's Guide. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA (2003).
- [3] BOSON, J., ÅGREN, G. JOHANSSON, L. A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 587, 304-314 (2008).
- [4] GILMORE, G., R. Practical Gamma-ray Spectrometry: 2nd Edition. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2008. ISBN 978-0-470-86196-7.
- [5] ZIDAN, W. I. Refining of a Mathematical Model for a HPGe Detector, Journal of Nuclear and Particle Physics, Vol. 5 No. 2, 2015, pp. 30-37. doi: 10.5923/j.jnpp.20150502.02.
- [6] HAU, I.D., RUSS, W.R., BRONSON, F. MCNP HPGe detector benchmark with previously validated Cyltran model. In Applied Radiation and Isotopes, Volume 67, Issue 5, 2009, pp. 711-715, ISSN 0969-8043.
- [7] SAINT-GOBAIN CRYSTALS. Scintibloc 51 S 51/2/B380 [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné na internete: <<https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/hps-mac3-cma-crystals/files/2021-09/2-4-5994.pdf>>.
- [8] MIRION TECHNOLOGIES. 802 Scintillation Detectors [online]. [cit. 2021-11-17]. Dostupné na internete: <https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/csp0232_802_super_spec_2.pdf?1557861234>.
- [9] MOUHTI, I., ELANIQUE, A., MESSOUS, M.Y., BELHORMA, B., BENAHMED, A. Validation of a NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) detector's models via measurements and Monte Carlo simulations,

- Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Volume 11, Issue 4, 2018, Pages 335-339, ISSN 1687-8507, <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.06.003>.
- [10] XCOM Photon Cross Sections Database (National Institute of Standards and Technology, Washington, DC, 2006) (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>).
 - [11] STRÍBRNSKÝ, B., PETRISKA, M., HINCA, R. Energy calibration of plastic scintillator detector. In SITEK, J., VAJDA, J., JAMNICKÝ, I. APCOM 2019. Melville: AIP Publishing, 2019, ISBN 978-0-7354-1873-8.
 - [12] TAKOUDIS, G., XANTHOS, S., CLOUVAS, A., ANTONOPOULOS-DOMIS, M., POTIRIADIS, C., SILVA, J. (2009). Spatial and spectral gamma-ray response of plastic scintillators used in portal radiation detectors; comparison of measurements and simulations. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 599. 74-81. 10.1016/j.nima.2008.10.020.
 - [13] MIN S., KIM Y., KO K.-H., et al. Optimization of Plastic Scintillator for Detection of Gamma-Rays: Simulation and Experimental Study. (2021) Chemosensors, 9(9):239.
 - [14] TSOLFANIDIS, N. Measurement and Detection of Radiation (McGraw-Hill, New York, 1983).
 - [15] BYOUNGIL, J., JONGYUL, K., MYUNGKOOK, M., GYUSEONG, C. Parametric optimization for energy calibration and gamma response function of plastic scintillation detectors using a genetic algorithm, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 930, 2019, Pages 8-14, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.003>.
 - [16] JEON, B., KIM, J., LEE, E., et al. 2021. "Pseudo-Gamma Spectroscopy Based on Plastic Scintillation Detectors Using Multitask Learning" Sensors 21, no. 3: 684. <https://doi.org/10.3390/s21030684>.
 - [17] TAHERI, A., ASKARI, M., GHOLIPOUR-PEYVANDI, R. Determination of Gaussian energy broadening parameters for organic scintillators. Journal of Instrumentation, 2016. 11. 1. 10.1088/1748-0221/11/05/P05020.
 - [18] CHANKYU, K., YEWON, K., MYUNGKOOK, M., GYUSEONG, C. Iterative Monte Carlo simulation with the Compton kinematics-based GEB in a plastic scintillation detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 795, 2015, Pages 298-304, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.007>.
 - [19] MIN, S., KANG, H., SEO, B., et al. Integrated and Portable Probe Based on Functional Plastic Scintillator for Detection of Radioactive Cesium. Appl. Sci. 2021, 11, 5210. <https://doi.org/10.3390/app11115210>.
 - [20] SICILIANO, E.R., ELY, J.H., KOUZES, R.T., ET AL. Energy calibration of gamma spectra in plastic scintillators using Compton kinematics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 594, Issue 2, 2008, Pages 232-243, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.031>.
 - [21] ASHRAFI, S., GHAHREMANI, G.M. Calibration of thin plastic scintillators using Compton scattered gamma-rays. Nuclear Inst. and Meth. in Phys. Res., 2011, A 642, pp. 70-74.
 - [22] NUVIA GROUP – osobná komunikácia.
 - [23] WONNACOTT, T.H., WONNACOTT, R.J. Introductory Statistics for Business and Economics. Wiley. 1990.
 - [24] MUKHOPADHYAY, S. Plastic Gamma Sensors: An Application in Detection of Radioisotopes. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2005. 5198.
 - [25] PAEPEN, J., SCHULTE, F., MASTINU, P., et al. Characterisation of plastic scintillators used as an active background shield for neutron detection; EUR 27930 EN; doi: 10.2787/810820.
 - [26] KIM, C., YOO, H., KIM, Y., et al. CALCULATION OF GAMMA SPECTRA IN A PLASTIC SCINTILLATOR FOR ENERGY CALIBRATION AND DOSE COMPUTATION. Radiat Prot Dosimetry. 2016 Sep;170(1-4):377-81. doi: 10.1093/rpd/ncw086. Epub 2016 Apr 28. PMID: 27127208.
 - [27] RAKES, K.D., "Evaluating the Response of Polyvinyl Toluene Scintillators used in Portal" (2008). Theses and Dissertations. 2727. DEPARTMENT OF THE AIR FORCE - AIR UNIVERSITY - AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY - Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
 - [28] BERTHOLD TECHNOLOGIES. BAI 9125 Water Monitor - Operating Manual.
 - [29] STRÍBRNSKÝ, B., HINCA, R. Influence of detector resolution on the occurrence of false alarms of radioactive wastewater monitors. In SITEK, J., VAJDA, J., JAMNICKÝ, I. APCOM 2021. Melville: AIP Publishing, 2021, ISBN 978-0-7354-4138-5.

- [30] BÉ, M.-M., CHISTÉ, V., DULIEU, C., BROWNE, E., BAGLIN, C., CHECHEV, V., KUZMENCO, N., HELMER, R., KONDEV, F., MACMAHON, D., LEE, K.B. Table of Radionuclides, BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, 2006.

7 Publikačná činnosť autora

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] STRÍBRNSKÝ, B. [70 %], HINCA, R. [8 %], FARKAS, G. [8 %], PETRISKA, M. [8 %], SLUGEN, V. [6 %] Modeling and optimization of HPGE detector GC0518 using MCNP5 code. In Radiation Protection Dosimetry. Vol. 198, No. 9-11 (2022), s. 704-711. ISSN 0144-8420.

Ostatné vedecké práce v databázach WoS a SCOPUS

- [2] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], HINCA, R. [20 %]. The comparison of energy resolution fitting functions for 1.5" NaI:TI, CsI:TI, LaBr₃:Ce, and CeBr₃ scintillation detectors. In APCOM 2021 : 26th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 23-25, 2021. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2021, Art. no. 070005 [6] s. ISBN 978-0-7354-4138-5.
- [3] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], PETRISKA, M. [10 %], HINCA, R. [10 %]. Energy calibration of plastic scintillator detector. In APCOM 2019 : 25th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 19-21, 2019. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2019, Art. no. 020044 [4] s. ISBN 978-0-7354-1873-8.
- [4] HINCA, R. [80 %], STRÍBRNSKÝ, B. [20 %]. Influence of detector resolution on the occurrence of false alarms of radioactive wastewater monitors. In APCOM 2021 : 26th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 23-25, 2021. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2021, Art. no. 080006 [6] s. ISBN 978-0-7354-4138-5.
- [5] HINCA, R., STRÍBRNSKÝ, B. Independent Ad-Hoc Radiation Monitoring of Obsolete Waste Water Discharge Channel near Jaslovske Bohunice Nuclear Facility. [Schválené v recenznom konaní a akceptované na publikovanie v: APCOM 2022 : 27th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 22-24, 2021].

Ostatné vedecké a odborné práce

- [6] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], HINCA, R. [20 %]. Modelling of a Plastic Scintillator Detector Using MCNP Code. In *ELITECH'19 [elektronický zdroj] : 21st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 29, 2019.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2019, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4915-2.
- [7] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], HINCA, R. [20 %]. LaBr₃:Ce detectors in gamma spectrometry. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [5] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
- [8] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], HINCA, R. [20 %]. Comparison of the most commonly used scintillation detectors. In *ELITECH'21 [elektronický zdroj]: 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021.* 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [5] s. ISBN 978-80-227-5098-1.
- [9] STRÍBRNSKÝ, B. [90 %], HINCA, R. [10 %]. Použitie rádioaktívneho indikátora ^{99m}Tc na meranie prietoku. In *20. Štiavnické dni 2019 : zborník recenzovaných príspevkov. Banská Štiavnica, Slovenská republika. 1.-3. októbra 2019.* 1. vyd. Bratislava : Univerzita Komenského v Bratislave, 2019, S. 132-140. ISBN 978-80-223-4795-2.
- [10] STRÍBRNSKÝ, B. [70 %], HINCA, R. [15 %], FARKAS, G. [15 %]. Odhad parametrov energetického rozlíšenia veľkoobjemového plastového scintilačného detektora. In *Odborná konferencia MG SNUS 2022 : Nový Tekov, Slovenská republika. 18. máj 2022.* Trnava : SNUS, 2022, S. 2-9. ISBN 978-80-89928-05-7.
- [11] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], HINCA, R. [20 %]. Sledovanie vybraných parametrov scintilačného detektora. In *XLI. Dny radiační ochrany : sborník abstraktů. Mikulov, Česká republika. 4.-8. 11. 2019.* 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2019, S. 113. ISBN 978-80-01-06649-2.
- [12] STRÍBRNSKÝ, B. [80 %], NEČAS, V. [20 %]. Vplyv veľkosti defektu v plášti úložného kontajnera pre vyhorené jadrové palivo na únik rádionuklidov z hlbinného úložiska. In *XL. Dny radiační ochrany : sborník abstraktů. Mikulov, Česká republika. 5.-9. 11. 2018.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018, S. 103. ISBN 978-80-01-06504-4.

- [13] STRÍBRNSKÝ, B. [75 %], HINCA, R. [10 %], FARKAS, G. [5 %], PETRISKA, M. [5 %], MIKULA, P. [5 %]. Modelovanie a optimalizácia modelu HPGe detektora GC0518 vo výpočtovom kóde MCNP5. In *XLII. Dny radiační ochrany : sborník abstraktů. Online, Česká republika. 8.-12.11.2021.* 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2021, S. 40. ISBN 978-80-01-06915-8.
- [14] HINCA, R. [25 %], STRÍBRNSKÝ, B. [25 %], ŠNÍRER, M. [25 %], SLUGENĚ, V. [25 %]. Radiačná záťaž betónových konštrukcií v okolí reaktora VVER 440 z pohľadu dlhodobej prevádzky. In *XLIII. Dni radiačnej ochrany 2022.* Bratislava: Slovenská zdravotnícka univerzita, 2022, s. 106. ISBN 978-80-89702-98-5.

Skriptá a učebné texty

- [15] HINCA, R. [90 %], STRÍBRNSKÝ, B. [10 %], Dozimetria a radiačná ochrana v jadrových zariadeniach: Učebný text pre študentov odboru elektrotechnika so zameraním na jadrové a fyzikálne inžinierstvo [elektronický zdroj]. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo SPEKTRUM STU, 2022. 112 s. ISBN 978-80-227-5179-7.

8 Summary

The dissertation thesis deals with radioactive waste activity measurement systems and free-release monitors used during the nuclear power plant operation and decommissioning process. The main goal of the thesis was to create representative models of the most frequently used detectors in radioactive contamination measurement systems and their validation. Based on the models, modelling and optimization of a specific measurement system were carried out. The first part of the thesis summarises legislative and normative requirements for the radioactive contamination measurement systems. Later, the most salient characteristics of the measurement systems and the detectors used are analysed. Then NaI:Tl, LaBr₃:Ce, HPGe and plastic scintillation detector were modelled. The detectors were modelled using MCNP5 code. The models, especially the HPGe model and the plastic scintillation detector model, were optimized based on the number of analyses. The last part of the work analyses the possibility of optimizing the radioactive wastewater monitor. The goal was to analyse the effect of replacing the NaI:Tl detector by a detector with better energy resolution in order to eliminate false alarms caused by insufficient energy resolution of the NaI:Tl detector. Analyses of energy resolution, detection efficiency and detection limit were performed. Based on the analyses, the detector replacement will meet legislative and normative requirements.

