

ZESLABENÍ PRONIKAVÉHO IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ V NOVĚ VYVÍJENÝCH MATERIÁLECH STÍNÍCÍCH VRSTEV PRO OCHRANNÉ ODĚVY

ATTENUATION OF PENETRATING IONISING RADIATION IN SHIELDING LAYERS OF NEWLY DEVELOPED PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT MATERIALS

Michaela Kozlovská^{a*}, Petr Otáhal^b

^aSÚJCHBO v.v.i., Kamenná 71, 262 31 Milín, Česká republika

^b SÚJCHBO v.v.i., Kamenná 71, 262 31 Milín, Česká republika

*Korespondující autor. e-mail: kozlovska@sujchbo.cz, tel.: +420 318 600 217

Abstrakt

V rámci výzkumného úkolu Inteligentní textilie proti CBRN látkám (VI20172020059) jsou vyvíjeny nové materiály, v budoucnu potenciálně využitelné jako stínící vrstva ochranných oděvů, která by účinně zeslabovala pronikavé gama a rentgenové záření o energiích do 100 keV.

Obsahem prezentovaného příspěvku je porovnání zeslabujících vlastností jednotlivých materiálů pro stínící vrstvu pomocí energetické závislosti jejich hmotnostních zeslabovacích koeficientů, výsledky prvotního experimentálního stanovení zeslabování pronikavého ionizujícího záření v daných materiálech pomocí vyhodnocení naměřených spekter gama záření různých radionuklidů, a výsledky počítačových Monte Carlo simulací tohoto zeslabování.

Klíčová slova: zeslabování ionizujícího záření, gamaspektrometrie, Monte Carlo simulace

Abstract

Within the framework of the Intelligent Tissue Research Project against CBRN Substances (VI20172020059), new materials are being developed for a shielding layer of protective clothing that would effectively attenuate penetrating gamma and X-rays with energies of up to 100 keV.

The paper presents a comparison of the attenuating properties of individual materials, intended for the shielding layer, by the energy dependence of their mass attenuating coefficients. Results of initial experimental determination of the penetrating ionising radiation attenuation in given materials by the evaluation of measured gamma spectra of different radionuclides and results of the Monte Carlo computer simulations of this attenuation are presented in the paper as well.

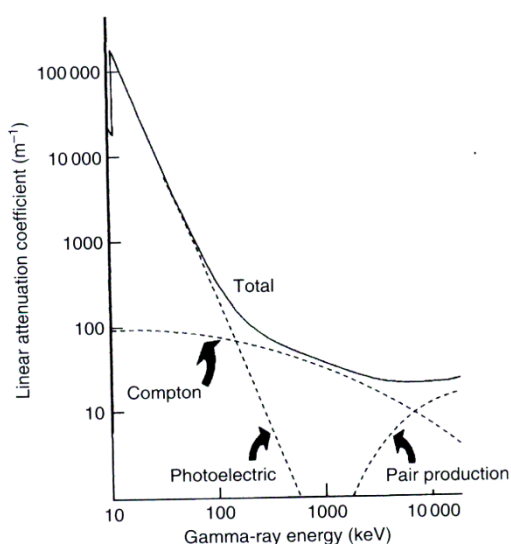
Key words: attenuation of ionising radiation, gammaspectrometry, Monte Carlo simulations

1. ÚVOD

1.1 Zeslabování rentgenového nebo gama záření v okolní látce

Při průchodu svazku rentgenového nebo gama záření látkou dochází k jeho zeslabení v důsledku interakcí jednotlivých fotonů záření s okolní látkou. Uplatňují se interakce fotonu s okolní látkou prostřednictvím fotoefektu, Comptonova rozptylu a pro vyšší energie gama záření i tvorby elektron-pozitronového páru. Zastoupení jednotlivých interakcí fotonů s látkou při průchodu svazku rentgenového či gama záření danou látkou, stejně jako celkový lineární součinitel zeslabení, udávající zeslabení intenzity záření při průchodu jednotkovou délkou daného materiálu, závisí na energii fotonů ve svazku záření. Zastoupení jednotlivých interakcí v závislosti na energii fotonů ve svazku je znázorněno na obr. 1.

Obr. 1: Závislost lineárního součinitele zeslabení na energii pro jednotlivé uplatňující se interakce fotonů s látkou a celkového součinitele zeslabení [1]



Pro zeslabení fotonového záření v okolní látce je důležitá zejména interakce prostřednictvím fotoefektu, kdy foton rentgenového nebo gama záření předá okolní látce veškerou svoji energii. Interakce prostřednictvím fotoefektu se uplatňuje především u nižších energií (viz obr. 1). Energie fotonového záření, pro kterou je v dané okolní látce dominantní interakcí fotoefekt, roste s rostoucím protonovým číslem okolní látky [2], proto jsou pro stínění gama záření vhodné materiály s vysokým protonovým číslem.

Zeslabení intenzity svazku rentgenového nebo gama záření o určité energii v důsledku interakcí fotonů s látkou, je možné popsat pro úzký kolimovaný svazek následujícím vztahem:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

kde: I_0 je intenzita záření o dané energii bez zeslabovacího materiálu ve svazku
 I je intenzita záření o dané energii po průchodu zeslabujícím materiálem
 μ [cm^{-1}] je *lineární součinitel zeslabení*, udávající zeslabení intenzity záření o dané energii v jednotce délky okolního materiálu
 x [cm] je tloušťka stínící vrstvy materiálu

Pomocí lineárního součinitele zeslabení je možné stanovit *hmotnostní součinitel zeslabení* μ/ρ , který charakterizuje zeslabení intenzity záření o dané energii v daném materiálu o jednotkové plošné hmotnosti:

$$\mu/\rho = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

kde: μ/ρ [cm^2/g] je *hmotnostní součinitel zeslabení*

μ [cm^{-1}] je *lineární součinitel zeslabení*

ρ [g/cm^3] je hustota okolní látky

Procentuální zeslabení svazku pro daný materiál a danou energii lze pak získat jako poměr:

$$\text{zeslabení svazku} = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100 [\%] \quad (3)$$

Zeslabení intenzity svazku rentgenového nebo gama záření v tomto případě udává procentuální část intenzity záření, která je vrstvou stínícího materiálu eliminována.

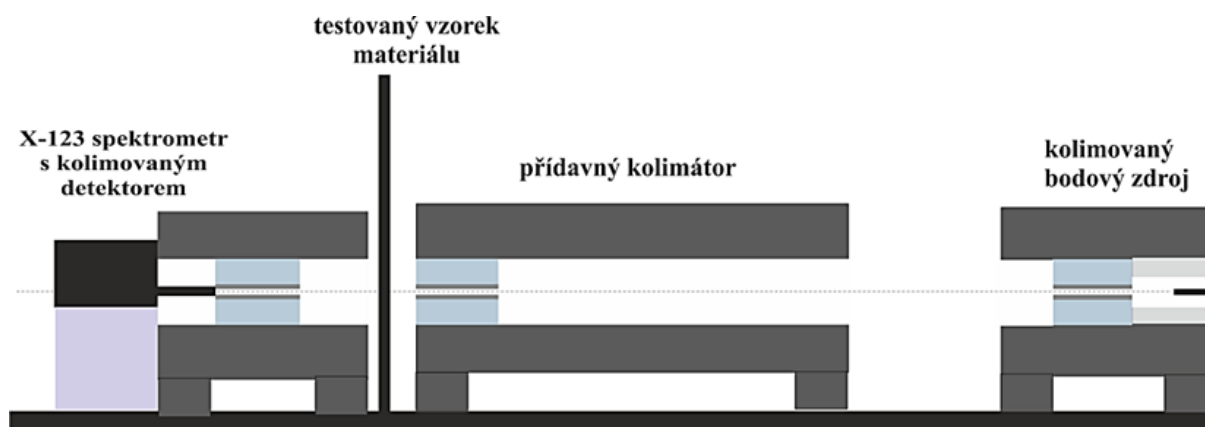
Ze zeslabení intenzity svazku rentgenového nebo gama záření o dané energii v dané vrstvě materiálu lze vyjádřit tzv. *ekvivalent olova*, který udává tloušťku vrstvy olova [mm], zeslabující intenzitu záření o příslušné energii stejně jako testovaný materiál.

1.2 Stanovení zeslabení intenzity rentgenového a gama záření ve stínícím materiálu

Stanovení zeslabení intenzity rentgenového a gama záření ve stínícím materiálu se provádí z vyhodnocených spekter rentgenového a gama záření různých radionuklidů. Na speciální testovací lavici jsou měřena spektra daného radionuklidu bez vložené vrstvy daného materiálu a s vrstvou daného materiálu, vloženou do svazku záření. V naměřených spektrech se vyhodnocují píky, odpovídající hlavním energetickým linkám záření použitých radionuklidů. Při prvotním testování dodaných vzorků se jednalo o radionuklidy ^{241}Am a ^{133}Ba .

Schéma měřicí geometrie je znázorněno na obr. 2.

Obr. 2: Geometrie měření



Spektra rentgenového a gama záření, pocházejícího z výše uvedených radionuklidů, jsou měřena na speciální testovací lavici, která umožňuje definované koaxiální nastavení zdroje, detektoru, vnějších a vnitřních kolimátorů a testovaného materiálu.

Měření spekter je prováděno v geometrii úzkého svazku, aby byl eliminován vrůstový faktor, kdy v případě měření spektra v geometrii širokého svazku dochází při průchodu testovacím materiálem k nadhodnocování počtu fotonů v nerozptýleném svazku vlivem příspěvku od vícenásobně rozptýlených fotonů [1]. K dosažení geometrie úzkého svazku se používají vnitřní olověné kolimátory s vnitřní měděnou vrstvou, která zeslabuje charakteristické záření olova, vznikající po dopadu rentgenového a gama záření na olověné kolimátory. Měřicím detektorem pro spektra rentgenového záření je integrovaný X-123 spektrometr s CdTe detektorem a Be okénkem (výrobcem je firma AMPTEK Inc., USA).

Pomocí programu GENIE 2K v. 3.2 jsou ve všech spektrech identifikovány píky a jsou určeny jejich čisté plochy (po odečtu čistých ploch píků pozadí). Zeslabení intenzity záření X nebo gama je pro danou energii záření stanoveno porovnáním čistých ploch píků ve spektrech, měřených v geometriích s testovaným materiálem, umístěným mezi kolimovaný bodový zdroj a kolimovaný detektor, a bez tohoto materiálu. K porovnání zeslabovacích vlastností stínících materiálů je rovněž stanovována energetická závislost hmotnostního koeficientu zeslabení a ekvivalent olova těchto materiálů.

1.3 Testované vzorky stínících materiálů

Testované vzorky stínících materiálů byly vyrobeny na katedře netkaných textilií a nanovlákných materiálů na Technické univerzitě v Liberci. K prvotnímu testování byly dodány následující vzorky materiálů: PVB (polyvinylbutyral), PVB+Bi₂O₃ mikro, PVB+Bi₂O₃ nano, PVB+Gd₂O₃ mikro, PVB+Nd₂O₃ mikro, PVB+Nd₂O₃ nano a PVB+Nd₂O₃ mikro-4 vrstvy. Hmotnostní poměr mezi jednotlivými oxidy těžších prvků a bází PVB byl 3:1. Všechny vzorky byly nanášeny na nosné vrstvě polypropylenu v úpravě spunbond. Plošné hmotnosti jednotlivých vzorků jsou prezentovány v tabulce 1, na obr. 3 je pak zobrazen jeden ze vzorků.

Tabulka 1: Plošná hmotnost testovaných vzorků

vzorek	plošná hmotnost [g/cm ²]	± [g/cm ²]
PP - spunbond	0,0033	0,0002
PP+PVB	0,007	0,001
PP+PVB+Bi ₂ O ₃ mikro	0,008	0,001
PP+PVB+Bi ₂ O ₃ nano	0,010	0,002
PP+PVB+Gd ₂ O ₃ mikro	0,010	0,001
PP+PVB+Nd ₂ O ₃ mikro	0,008	0,001
PP+PVB+Nd ₂ O ₃ nano	0,012	0,001
PP+PVB+Nd ₂ O ₃ mikro 4 vrstvy	0,0434	0,0004

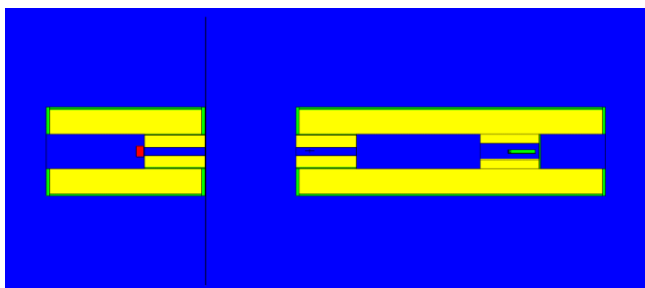
Obr. 3: Vzorek nosného PP s nanesenou vrstvou PVB s obsahem oxidu těžšího prvku



1.4 Monte Carlo simulace zeslabení rentgenového a gama záření ve vybraných vzorcích

Monte Carlo simulace byly prováděny s využitím Monte Carlo transportního kódu MCNPX 2.6.0. Pro stanovení zeslabení záření gama ve vybraných vzorcích s využitím Monte Carlo simulací byl využit model geometrického uspořádání shodný s měřicí geometrií. Materiálové složení simulovaných materiálů bylo voleno s využitím materiálového kompendia pro MC simulace [3]. Vizualizace upraveného geometrického uspořádání z programu Vised je uvedena na obr. 4. Dalšího zjednodušení bylo dosaženo aproximací detektoru buňkou obsahující pouze citlivý objem detektoru z materiálu CdTe. Vzhledem k relativnímu vyhodnocení výsledků je možné toto zjednodušení uvažovat. Pro simulace byl používán monoenergetické zdroj o energiích uvedených dále.

Obr. 4: Upravené geometrické uspořádání modelu



Pro první sérii simulací byly zvoleny modely vzorků materiálů PVB, PVB +Gd₂O₃ (mikro) a PVB+Nd₂O₃ (nano). Pro zjednodušení simulací byla nosná textilie z PP zanedbána, neboť zeslabení intenzity záření, způsobené touto látkou, lze považovat za zanedbatelné. Dále v rámci zjednodušení byla v modelu použita aproximace vzorku vrstvou homogenní látky o stejném prvkovém složení a stejné plošné hmotnosti. Plošná hmotnost dodaných vzorků byla zjištěna experimentálně. Hmotnostní zastoupení oxidů těžších prvků v simulovaném vzorku bylo voleno stejné jako u vyrobených vzorků.

Prvotní simulace byly rozděleny do následujících okruhů:

- Simulace nestíněného monoenergetického svazku v rozsahu energií 30 – 100 keV po 10 keV

- Simulace nestíněného monoenergetického svazku o energiích 35,3 keV, 59,5 keV a 80,3 keV (vybrané energie používané při měření)
- Simulace monoenergetického svazku v rozsahu energií 30 – 100 keV po 10 keV stíněného vzorkem obsahujícím pouze vrstvu PVB o plošné hmotnosti odpovídající reálnému vzorku
- Simulace monoenergetického svazku v rozsahu energií 30 – 100 keV po 10 keV stíněného vzorkem obsahujícím pouze vrstvu PVB o desetinásobné plošné hmotnosti než jakou má reálný vzorek
- Simulace monoenergetického svazku v rozsahu energií 30 – 100 keV po 10 keV stíněného vzorkem obsahujícím vrstvu PVB obohacenou o Gd_2O_3 v hmotnostním poměru 1:3 o plošné hmotnosti odpovídající reálnému vzorku
- Simulace monoenergetického svazku o energiích 35,3 keV, 59,5 keV a 80,3 keV (vybrané energie používané při měření) stíněného pouze vrstvou PVB o plošné hmotnosti odpovídající reálnému vzorku
- Simulace monoenergetického svazku o energiích 35,3 keV, 59,5 keV a 80,3 keV (vybrané energie používané při měření) stíněného vzorkem obsahujícím vrstvu PVB obohacenou o Gd_2O_3 v hmotnostním poměru o plošné hmotnosti odpovídající reálnému vzorku
- Simulace monoenergetického svazku o energiích 35,3 keV, 59,5 keV a 80,3 keV (vybrané energie používané při měření) stíněného vzorkem obsahujícím vrstvu PVB obohacenou o Nd_2O_3 v hmotnostním poměru 1:3 o plošné hmotnosti odpovídající reálnému vzorku
- Simulace monoenergetického svazku o energiích 35,3 keV, 59,5 keV a 80,3 keV (vybrané energie používané při měření) stíněného pouze vrstvou olova o plošné hmotnosti odpovídající simulovaným vzorkům (PVB, PVB+ Gd_2O_3 , PVB+ Nd_2O_3)

Pro stanovení zeslabení intenzity rentgenového a gama záření ve vzorku bylo provedeno porovnáním skórovaných veličin ve svazku záření stíněném a nestíněném. Pro porovnání výsledků bylo stanoveno procentuální zeslabení počtu fotonů záření gama ve svazku, nebo procento z celkového počtu fotonů v nestíněném monoenergetickém svazku odpovídající energie.

2. EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY

Zeslabení intenzity rentgenového a gama záření, procházejícího vzorky testovaných materiálů, je prezentováno v tabulce 2.

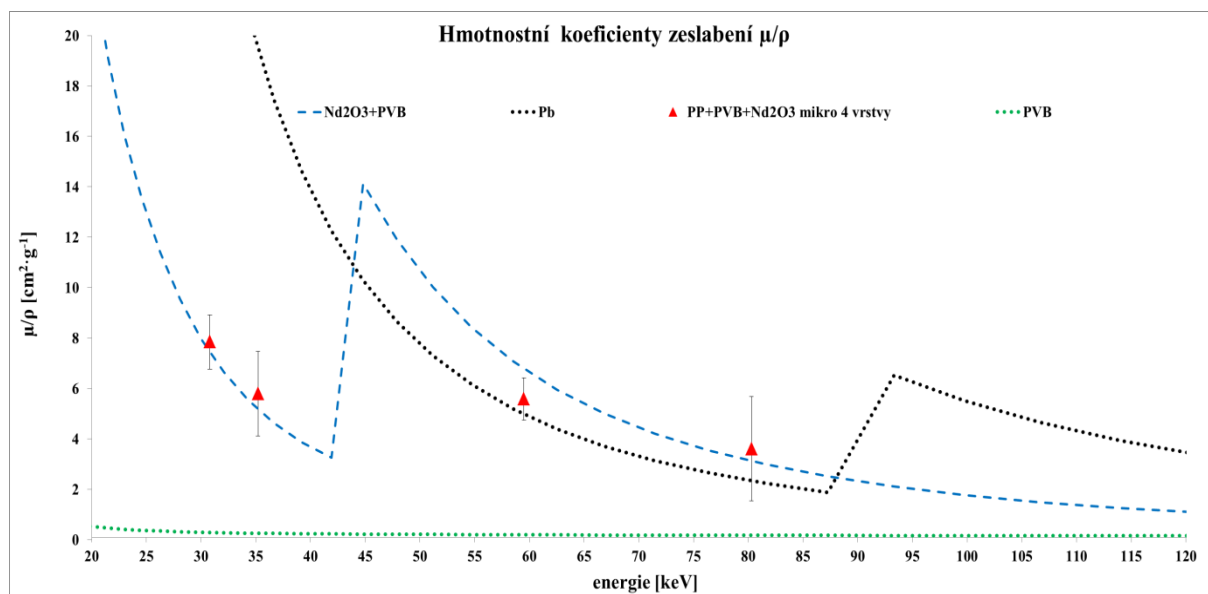
Tabulka 2: Zeslabení intenzity rentgenového a gama záření v testovaných materiálech

vzorek	PP+PVB		PP+PVB+Bi ₂ O ₃ mikro		PP+PVB+Bi ₂ O ₃ nano		PP+PVB+Gd ₂ O ₃ mikro		PP+PVB+Nd ₂ O ₃ mikro		PP+PVB+Nd ₂ O ₃ nano		PP+PVB+Nd ₂ O ₃ mikro 4 vrstvy	
	zesl. [%]	± [%]	zesl. [%]	± [%]	zesl. [%]	± [%]	zesl. [%]	± [%]	zesl. [%]	± [%]	zesl. [%]	± [%]	zesl. [%]	± [%]
4,5	12,9	2,5	19,2	2,6	23,5	4,3	19,8	3,2	19,1	2,7	5,8	3,6	28,5	3,0
7,6	7,5	3,6	12,4	2,9	16,3	2,0	---	---	10,5	2,7	4,5	3,3	26,1	1,9
30,8	---	---	11,2	1,9	14,9	4,1	3,9	3,4	8,6	4,9	8,4	2,8	28,9	2,4
35,2	---	---	5,9	4,7	---	---	---	---	6,3	4,9	---	---	22,2	4,1
59,5	---	---	0,8	1,4	2,0	1,4	4,2	2,1	3,6	1,7	4,7	3,8	21,5	2,1
80,3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	14,5	12,6

Pozn: U vzorku PVB nebylo možno stanovit zeslabení intenzity záření pro vyšší energie, protože tento materiál vyšší energie pronikavého ionizujícího záření prakticky nezaslabuje. V případě ostatních vzorků není uveden výsledek zeslabení intenzity záření v případě, že byl rozptyl naměřených hodnot čistých ploch píků příliš vysoký.

Hodnoty zeslabení fotonového záření v jednotlivých vzorcích nelze kvalitativně porovnat díky rozdílné plošné hmotnosti jednotlivých vzorků, kdy tudíž vzorek méně zeslabujícího materiálu o vyšší plošné hmotnosti může fotonové záření zeslabovat lépe než vzorek více zeslabujícího materiálu o nižší plošné hmotnosti.

Obr. 5: Hmotnostní koeficienty zeslabení μ/ρ



Na obrázku 5 je zobrazena závislost hmotnostního koeficientu zeslabení μ/ρ na energii pro směs sloučenin Nd_2O_3 a PVB v hmotnostním poměru 3:1, olova, PVB a experimentálně stanovených hodnot pro vzorek materiálu PP+PVB+ Nd_2O_3 mikro 4 vrstvy. Tabeľované hodnoty hmotnostních koeficientů zeslabení pro jednotlivé sloučeniny a dané energie byly převzaty z databáze NIST [4].

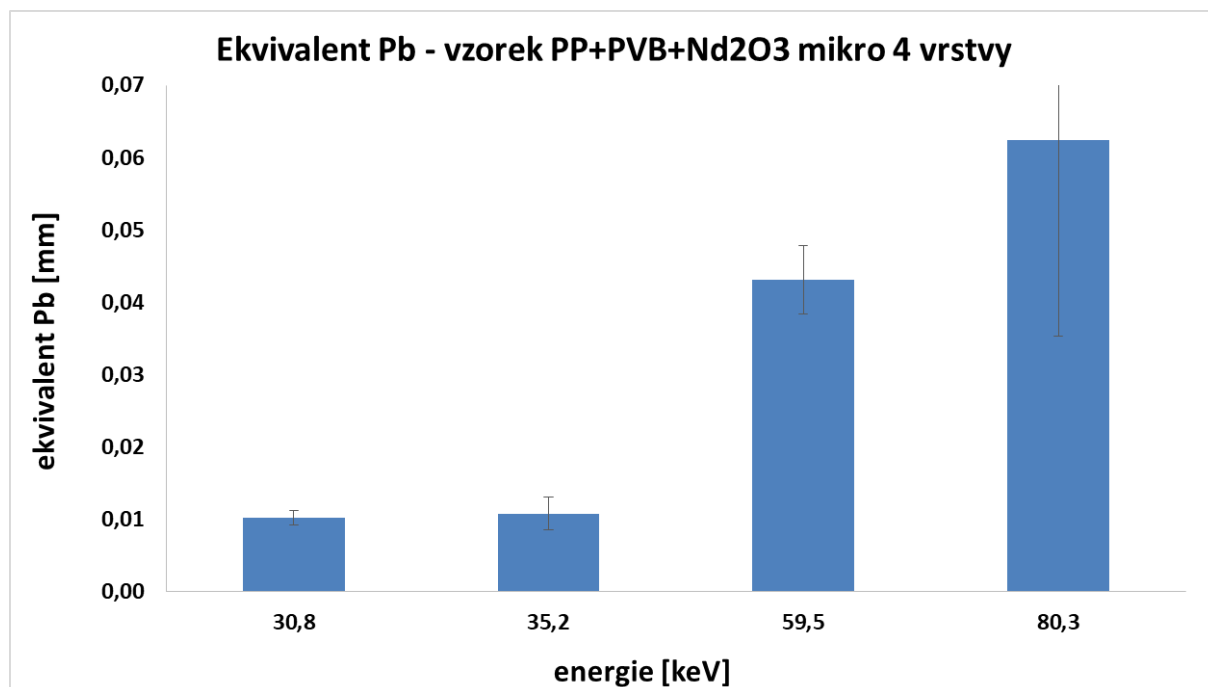
Pomocí hmotnostního koeficientu zeslabení, který udává zeslabení pronikavého záření v daném materiálu o jednotkové plošné hmotnosti, je možno kvalitativně porovnávat zeslabující vlastnosti jednotlivých stínících materiálů. Z obr. 5 je zřejmé, že báze PVB nezaslabuje pronikavé záření oproti směsi PVB a oxidu těžšího prvku, respektive olovu, prakticky vůbec.

Experimentálně stanovené hodnoty hmotnostního koeficientu zeslabení pro daný vzorek stínícího materiálu odpovídají pro příslušné energie hodnotám tabelovaným, tudíž lze usuzovat na správnost měření a stanovení hodnot zeslabení intenzity záření v materiálu, hmotnostních absorpčních koeficientů a ekvivalentu olova pro jednotlivé stínící materiály. Výjimkou jsou experimentálně stanovené hodnoty hmotnostního koeficientu zeslabení pro energie 4,6 a 7,6 keV u vzorků stínících materiálů, obsahujících oxidy těžších prvků, kdy jsou pro tyto energie stanovené hodnoty hmotnostního koeficientu zeslabení (a tudíž i samotné hodnoty zeslabení intenzity ionizujícího záření) výrazně nižší, než tabelované hodnoty, zatímco u vzorku PVB

stanovené hodnoty hmotnostního koeficientu zeslabení odpovídají tabelovaným hodnotám. Příčinou zřejmě může být charakteristické rentgenové záření mědi, které vzniká po dopadu rozptýleného záření na vnitřní kolimátor a navyšuje tak počet impulsů v čisté ploše píku ve spektru měřeném v měřící geometrii se vzorkem mezi zdrojem a detektorem.

V oblasti energií cca 45 – 87 keV jsou díky přítomnosti absorpční hrany hodnoty hmotnostního koeficientu zeslabení u směsi sloučenin PVB a Nd_2O_3 vyšší než u olova, proto tato směs sloučenin zeslabuje rentgenové a gama záření o energii v daném energetickém rozpětí lépe než olovo. V oblastech vyšších nebo nižších energií pak tato směs sloučenin zeslabuje rentgenové a gama záření výrazně hůře, než olovo. To dokládají i experimentálně stanovené hodnoty ekvivalentu olova této směsi sloučenin, které jsou pro energie 30,8 a 35,2 keV výrazně nižší, než pro energie 59,5, respektive 80,3 keV – viz obr. 6.

Obr. 6: Ekvivalent olova pro různé energie rentgenového a gama záření.

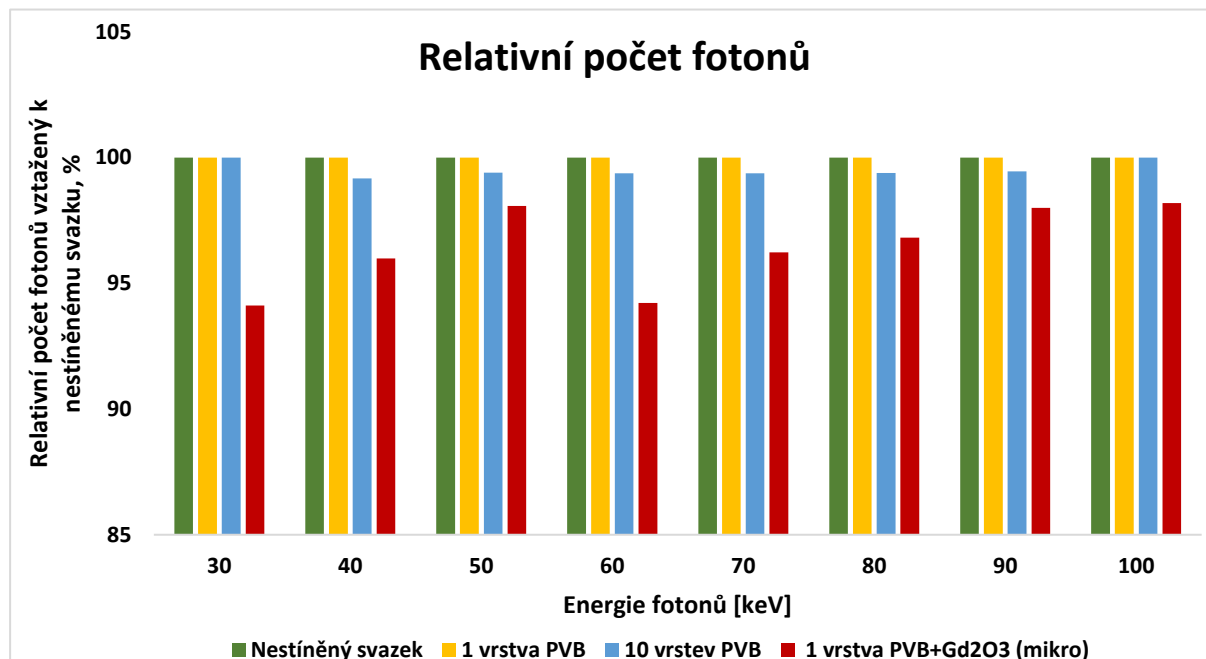


3. VÝSLEDKY MONTE CARLO SIMULACÍ

Na obr. 7 je prezentován relativní počet fotonů v simulovaném stíněném svazku, vztažený k počtu fotonů v nestíněném svazku. V grafu jsou prezentovány výsledky pro monoenergetický svazek v rozsahu energií 30 – 100 keV po 10 keV. Jako stínící vzorek byly uvažovány vrstva PVB o odpovídající plošné hmotnosti, a dále vrstva PVB s desetinásobnou plošnou hmotností. Rovněž byl simulován vzorek vrstvy PVB obohacený o Gd_2O_3 v hmotnostním poměru 1:3. V souladu s očekáváním je zeslabení způsobené pouze vrstvou PVB zanedbatelné, stejných výsledků je dosaženo i při použití vrstvy PVB o desetinásobné plošné hmotnosti. Signifikantního zeslabení je dosaženo až s využitím vrstvy PVB obohacené o Gd_2O_3 . Závislost zeslabení na energii pro tento vzorek ukazuje na výhodu využití materiálu s vhodnou absorpční hranou. Ve

výsledcích je vliv absorpční hrany materiálu patrný v oblasti nad 50 keV, což odpovídá průběhu závislosti hmotnostního koeficientu zeslabení na energii.

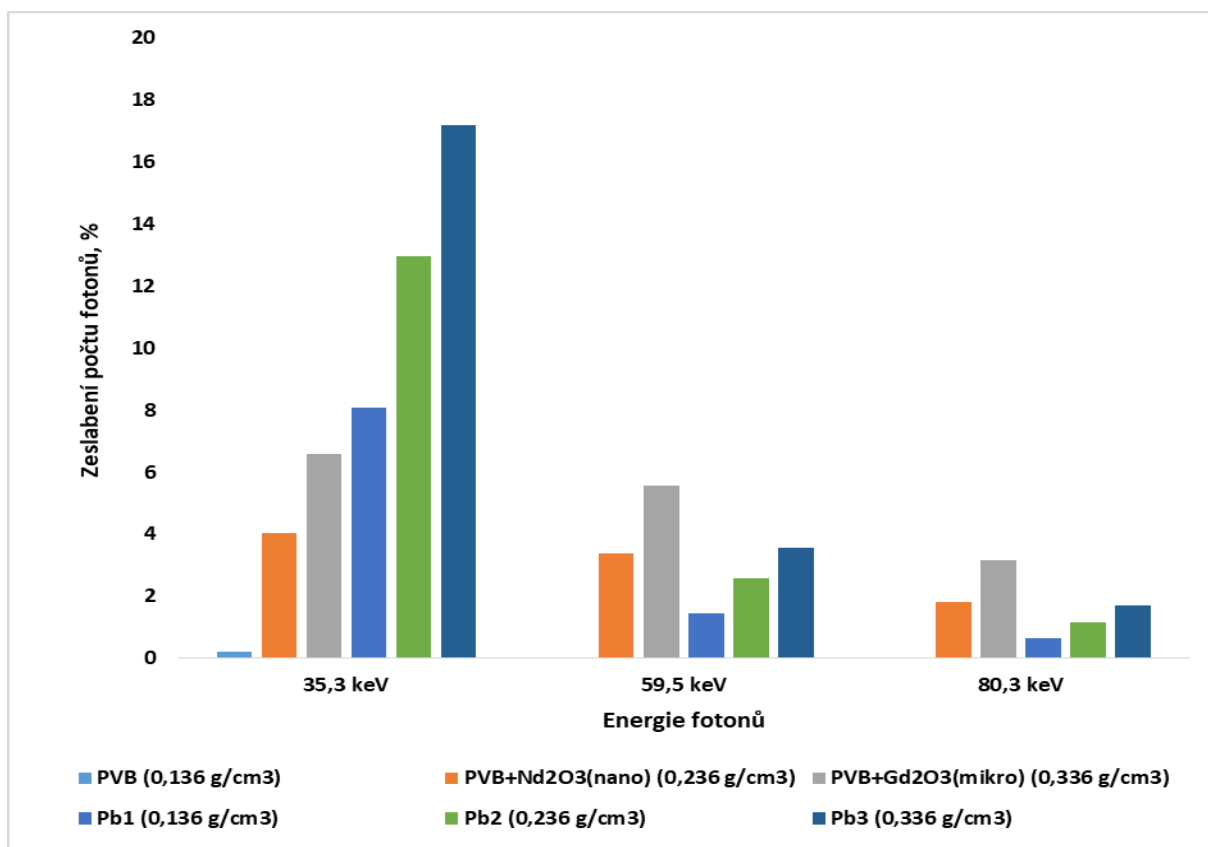
Obr. 7: Relativní počet fotonů v simulovaném stíněném svazku



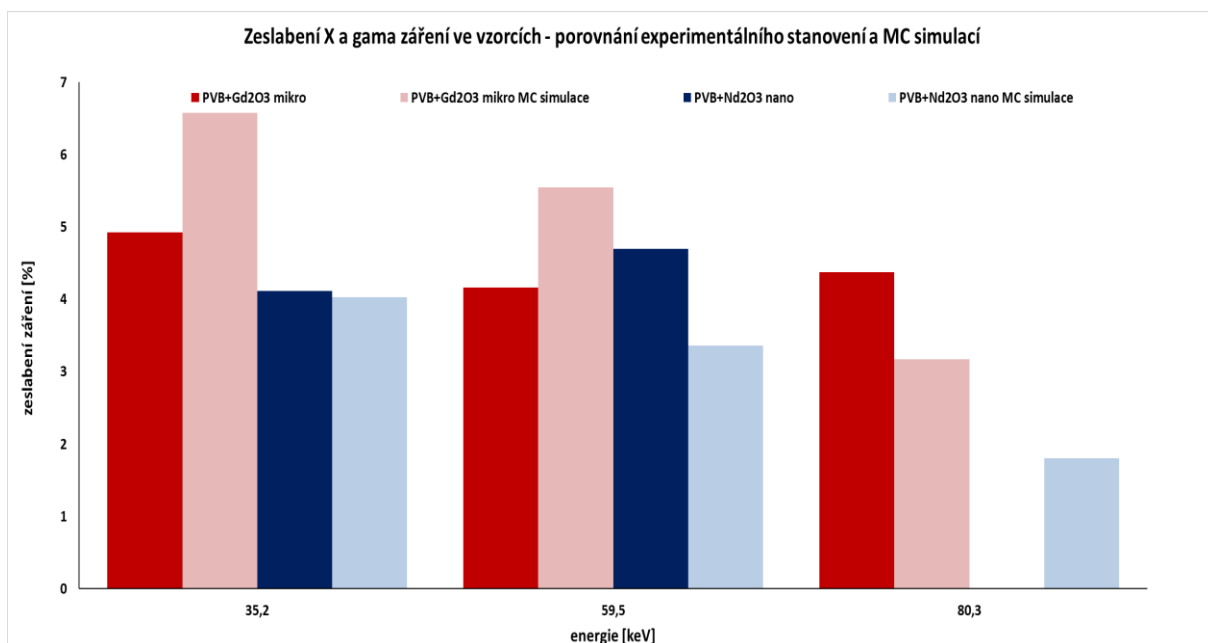
Na obr. 8 jsou prezentovány výsledky simulací pro monoenergetický svazek o vybraných energiích, které jsou používány pro měření (35,3 keV, 59,5 keV a 80,3 keV). Vzorky stínících materiálů PVB, a PVB obohacené o Gd₂O₃, resp. Nd₂O₃ v hmotnostním poměru 1:3 byly porovnávány se stíněním vrstvou olova o odpovídající plošné hmotnosti. Z výsledků je patrné, že v uvažovaném energetickém rozsahu nejlépe stíní vzorek materiálu PVB obohacený o Gd₂O₃. Dále je z uvedených výsledků patrná výhodnost použití materiálů s vhodnými absorpčními hranami. Zkoumané vzorky vykazují lepší stínící vlastnosti než olovo o odpovídající plošné hmotnosti pro energie 59,5 a 80,3 keV, což odpovídá průběhu energetické závislosti hmotnostních zeslabovacích koeficientů daných sloučenin.

Na obr. 9 jsou porovnány hodnoty zeslabení intenzity rentgenového a gama záření ve vybraných vzorcích, stanovené experimentálně a pomocí MC simulací. U směsí sloučenin PVB a Gd₂O₃ mikro, respektive PVB a Nd₂O₃ nano si hodnoty zeslabení intenzity rentgenového a gama záření stanovené experimentálně a pomocí MC simulací v rámci nejistot odpovídají (pozn.: pro energii 80,3 keV nebyla v důsledku velkého rozptylu naměřených hodnot čistých ploch píků hodnota zeslabení intenzity gama záření u směsi sloučenin PVB a Nd₂O₃ nano stanovena).

Obr. 8: Simulace zeslabení monoenergetického svazku záření ve vzorcích stínících materiálů



Obr. 9: Porovnání experimentálních výsledků zeslabení intenzity záření ve vzorcích a MC simulací



4. ZÁVĚR

U testovacích vzorků, vyrobených v TUL, bylo experimentálně stanoveno zeslabení rentgenového a gama záření vybraných radionuklidů v daném testovaném materiálu, a rovněž byly stanoveny energetické závislosti hmotnostního koeficientu zeslabení a ekvivalentu olova. Experimentálně stanovené hmotnostní koeficienty zeslabení odpovídají tabelovaným hodnotám pro dané energie, což svědčí o správnosti experimentálního postupu. Výjimkou jsou dvě nejnižší hodnoty energie záření, u kterých zřejmě dochází k navýšení velikosti čisté plochy odpovídajících píků po průchodu záření daným materiálem vlivem charakteristického záření mědi, obsažené v kolimátorech.

Na základě Monte Carlo simulací byl stanoven relativní počet fotonů v simulovaném stíněném svazku při průchodu vybranými stínícími materiály, vztažený k počtu fotonů v nestíněném monoenergetickém svazku v rozsahu energií 30 – 100 keV po 10 keV. Rovněž byly na základě MC simulací stanoveny hodnoty zeslabení intenzity rentgenového a gama záření o energiích, odpovídajících reálnému měření, které prochází vybranými stínícími materiály. Hodnoty zeslabení intenzity záření, stanovené experimentálně a pomocí MC simulací, si u materiálů s obsahem oxidů těžších prvků odpovídají.

Poděkování

Výzkum byl podpořen z projektu Inteligentní textilie proti CBRN látkám (VI20172020059).

Použitá literatura

- [1] Gilmore, G.; et al. *Practical Gamma-ray Spectrometry*, 2nd ed.; Wiley: USA, 2011.
- [2] Attic, Frank Herbert. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. New York: J. Wiley-Interscience, ©1986. xxi, 607 s. ISBN 0-471-01146-0.
- [3] McConn, R. J. Jr., Gesh, C. J., Pagh, R. T., Rucker, R. A. and Williams, R. G. III. *Compendium of material composition data for radiation transport modeling*, PNNL-15870 Rev. 1. Pacific Northwest National Laboratory (2011).
- [4] Databáze NIST - <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>,
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>