



Ověření účinnosti nově vyvíjených textilií určených k ochraně před účinky ionizujícího záření.

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství
Autor práce: **Bc. Jana Otáhalová**
Vedoucí práce: Mgr. Petr Otáhal, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering ■

Effectiveness of the newly developed textiles for protection against the effects of ionizing radiation.

Diploma thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering

Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Bc. Jana Otáhalová**

Supervisor: Mgr. Petr Otáhal, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana Otáhalová**
Osobní číslo: **T13000150**
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor: **Produktové inženýrství**
Název tématu: **Ověření účinnosti nově vyvíjených textilií určených k ochraně před účinky ionizujícího záření.**
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. V rešeršní části práce vysvětlíte pojem ionizující záření, jak ovlivňuje lidské zdraví, jak se proti němu chránit. Popište obleky snižující účinnost ionizujícího záření (z hlediska střihu a materiálu), specifikujte, v jakých případech se oblek využívá, jaké jsou na něj kladené nároky. Zaměřte se také na komfort nošení obleků. Sledujte trendy ve vývoji materiálů využívaných k ochraně před IZ.
2. Charakterizujte textilie vyvinuté na Katedře netkaných textilií Textilní fakulty TUL. Popište tyto vzorky z hlediska složení, jejich výroby, účinných prvků.
3. Navrhněte a realizujte vhodný experiment ke zjištění míry účinnosti textilií stávajících i nově navržených. Zaměřte se přitom na oblast nízkenergetického gama záření. Objektivně zhodnoťte také komfortní charakteristiky sledovaných materiálů. Na základě získaných výsledků porovnejte materiály stávající s materiály nově navrhovanými - jak z hlediska účinnosti, tak z hlediska komfortu. Pokuste se navrhnout optimální podobu obleku chránícího před účinky ionizujícího záření.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.

HES, Luboš. Úvod do komfortu textilií. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita, 2005.

MOE, H.J. a E.J. VALLARIO. Operational Health Physics Training. USA: Argonne National Laboratory, 1988. ISBN ANL-88-26.

SÚRO, v.v.i. Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. [online]. 2014 SÚRO, v.v.i. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/index.html>

REISENAUER, Roman. Metody matematické statistiky a jejich aplikace v technice. 2. revidované a doplněné. Praha: SNTL, 1970.

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Petr Otáhal, Ph.D.**

SÚJCHBO, v.v.i.

Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Mikeš, Ph.D.**


Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání diplomové práce: **24. ledna 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **8. ledna 2016**



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka



doc. Ing. Vladimír Bažžík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 23. listopadu 2015

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji Dr. Petru Mikešovi z Katedry netkaných textilií TUL za poskytnutí vzorků nově vyvíjených materiálů určených k ochraně před účinky ionizujícího záření, a Státnímu ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. za možnost proměření těchto materiálů.

Abstrakt

Olovené vesty určené k ochraně před účinky ionizujícího záření jsou z hlediska požadavků jejich uživatelů značně nekomfortní. Nedostatky plynou z faktu, že jako stínící materiál je ve většině z nich použito olovo. Trendem ve vývoji obleků je použití jiných prvků a jejich sloučenin, a také využití moderních výrobních technologií. Kombinace těchto přístupů vede primárně ke zvýšení ochrany těla, a v druhé řadě také ke zvýšení komfortu nošení těchto ochranných pomůcek. Za použití přístrojů FX300 a Alambeta byly proměřeny vzorky textilie Biorubber společnosti Yamamoto Corporation. Materiály vykazují velmi nízkou prodyšnost, malou měrnou tepelnou vodivost, nízké hodnoty tepelného toku.

Přístrojem Falcon 5000® byla ověřena účinnost materiálu Biorubber a vzorků dodaných Katedrou netkaných textilií Textilní fakulty Technické univerzity v Liberci. U všech vzorků byl zjištěn faktor zeslabení v řádech jednotek procent.

U vybraných vzorků byla provedena simulace interakce záření s hmotou - předpokládaná stínící schopnost materiálu při změně tloušťky účinné vrstvy. Zařazení simulace do procesu vývoje nových CBRN materiálů může pomoci ověřit hypotézy o stínících vlastnostech jednotlivých prvků a jejich směsí.

Klíčová slova

Radiační ochrana, ochranné obleky, komfort nošení, Monte Carlo simulace

Abstract

Lead vests designed to protect against the effects of ionizing radiation are not ideal for their users. Shortcomings stem from the fact that lead is used as a shielding material in most of them. The trend in the developing the suits is the use of other elements and their compounds, and the use of modern production technologies. The combination of these approaches leads primarily to increased protection of the body, and in the second place also to increased clothing comfort of these protective devices. Using the FX300 and Alambeta devices Yamamoto Corporation's Biorubber samples were measured. The materials show very low permeability, low thermal conductivity and low values of heat flux.

Falcon 5000® machine was used to verify efficiency of Biorubber and also of samples supplied by the Department of nonwovens and Nanofibrous materials of the Technical University of Liberec. Low attenuation factor has been detected in case of all samples.

For selected samples an interaction of radiation with matter was simulated - expected material's ability to reduce ionizing radiation for different thicknesses of the active layer. Involving the simulations into the developing process may verify the hypotheses on shielding properties of both elements and their compounds.

Key words

Radiation protection, personal protective clothes, clothing comfort, Monte Carlo simulation

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	10
Úvod.....	12
1. Radioaktivita, ionizující záření.....	13
1.1 Typy přeměn	15
1.2 Interakce gama záření s hmotou.....	17
1.3 Biologické účinky ionizujícího záření	18
1.4 Ochrana před ionizujícím zářením	19
2. Obleky	21
2.1 Současný stav osobní ochrany proti účinkům ionizujícího záření	21
2.2 Trendy ve vývoji nových ochranných oděvů	30
2.3 Tepelně izolační vlastnosti vybraných obleků	32
2.4 Termofyziologické vlastnosti.....	37
3. Katedra netkaných textilií, Fakulta textilní, TUL	40
3.1 Popis vzorků Katedry netkaných textilií.....	40
4. Přístroje a zařízení pro experiment.....	44
4.1 Falcon 5000®	44
4.2 Zářiče.....	44
5. Pracovní postup	46
5.1 Stanovení pozadí.....	46
5.2 Stanovení spektra Americia 241	47
5.3 Měření vzorku Biorubber	48
5.4 Měření testovaných vzorků TUL	49
6. Simulace interakce prvků s hmotou	54
6.1 Simulace olovo.....	58

6.2	Simulace Biorubber.....	59
6.3	Simulace vzorků TUL.....	61
7.	Závislost redukce dávky na druhu a tloušťce vrstvy stínícího materiálu	66
7.1	Ideální oblek.....	69
	Závěr	71
	Použitá literatura	73
	Seznam obrázků.....	77
	Seznam grafů	78
	Seznam tabulek	79

Seznam použitých symbolů a zkratek

a	Měrná teplotní vodivost, [m^2s^{-1}]
b	Tepelná jímavost, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}/2\text{K}^{-1}$]
CBRN	Chemical, biological, radiological and nuclear
FZ	faktor zeslabení [%]
h	Tloušťka textilie, [mm]
IZ	ionizující záření, ionizing radiation
K	Kelvin
keV	kiloelektronvolt, $1\text{ eV} = 1,602\cdot 10^{-19}\text{ J}$
KNT	Katedra netkaných textilií
m	metr
MeV	megaelektronvolt, $1\text{ eV} = 1,602\cdot 10^{-19}\text{ J}$
P	propustnost pro vodní páry [%]
PVB	polyvinylbutyral
q	Tepelný tok, [W/m^2]
r	Plošný odpor vedení tepla, [$\text{W}^{-1}\text{K}\cdot\text{m}^2$]
Rct	tepelný odpor
Ret	výparný odpor
SEM	elektronový rastrovací mikroskop (scanning electron microscope)
SÚJB	Státní úřad jaderné bezpečnosti
SÚJCHBO	Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany

SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
TeV	teraelektronvolt, $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
v.v.i.	veřejná výzkumná instituce
W	Watt
λ	Měrná tepelná vodivost, $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ρ_S	Plošná hmotnost textilie, $[\text{g} \cdot \text{m}^{-2}]$

ÚVOD

Radioaktivita je vlastnost některých jader atomů samovolně se rozpadat, přeměňovat se na jádra jednodušší a uvolňovat energii ve formě záření, jedná se o přirozený jev. Byla objevena v roce 1896 francouzským fyzikem Antoine Henri Becquerelem (1852-1908). Člověk je nejvíce ovlivněn radioaktivitou z přírodních zdrojů - půdy, vody, vesmíru. Umělé zdroje záření (jaderné elektrárny, rentgenové záření) mají na celkovém záření výrazně menší podíl. Mezi místa s výskytem ionizujícího záření patří především jaderná zařízení, radioterapeutická pracoviště nebo oddělení nukleární medicíny. Při činnostech vedoucích k ozáření je nutno zajistit, aby rizika ozáření, která při této radiační činnosti vznikají, nepřevyšovala přínos. Je nutné omezovat ozáření osob tak, aby celková radiační dávka za dané období nepřesahovala stanovený limit.

Trendem ve vývoji ochranných oděvů proti ionizujícímu záření je snížení tloušťky ochranné vrstvy, snižování hmotnosti obleků, velký důraz je kladen na komfort nošení. Mezi základní komfortní charakteristiky patří tepelně izolační vlastnosti, prodyšnost a termofyziologické vlastnosti. Vývojem nových ochranných materiálů se zabývá i Katedra netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. V rámci projektu „Výzkum možností aplikace nových materiálů (se zaměřením na nanomateriály) a progresivních technologií k ochraně osob proti působení CBRN látek s důrazem na kritickou infrastrukturu” byly připraveny vzorky textilií, které je třeba otestovat. Při hodnocení stínících schopností daných materiálů je nutné zvolit „střední cestu“ - kompromis, díky kterému vznikne materiál dostatečně chránící ozařované osoby, ale zároveň materiál vyhovující požadavkům na oděvní komfort.

1. RADIOAKTIVITA, IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Radioaktivita byla objevena v roce 1896 francouzským fyzikem Antoine Henri Becquerelem (1852-1908). Zjistil, že některé látky vydávají záření i bez vnějšího podnětu, mají tedy svůj vlastní zdroj energie. Základními otázkami bylo, odkud se tato energie bere a jak je možné, že přeměna jednoho prvku v druhý probíhá v přírodě samovolně. Postupně bylo zjištěno, že existuje několik druhů radioaktivního záření, které se liší schopností pronikat látkou a mají také odlišné chování v magnetickém a elektrickém poli. Označeny byly jako záření alfa, beta a gama [1].

Radioaktivita znamená schopnost atomových jader vysílat záření, přičemž se mohou přeměnit v jiná jádra. Rozlišujeme 2 druhy radioaktivity: přirozená (radionuklidy, které se běžně vyskytují v přírodě) a umělá, kdy jsou radionuklidy vytvořené v jaderných reaktorech. Nejvíce nás ovlivňuje radioaktivita z přírodních zdrojů - půdy, vody, vesmíru (kosmické záření, které na Zemi dopadá nerovnoměrně v závislosti na nadmořské výšce a poloze na Zemi). Podstatný podíl na přírodní radioaktivitě má plyn radon, který se uvolňuje ze zemské kůry a neustále se přeměňuje na radioaktivní atomy, které se mohou deponovat např. na prach ve vzduchu. Menší podíl na radioaktivním záření životního prostředí mají uměle vytvořené zdroje, mezi které patří tepelné elektrárny (při spalování uhlí), jaderné elektrárny, dopady testů jaderných zbraní do roku 1963, kdy bylo testování zakázáno, rentgenové záření [1].

Zdrojem ionizujícího záření je radioaktivní látka nebo předmět, který obsahuje radionuklidy nebo je jimi znečištěn. Dále pak zařízení, které zářič obsahuje (různé měřicí přístroje), zařízení, při jehož provozu vznikají radionuklidy (jaderné reaktory, urychlovače) a zařízení, při jehož provozu vzniká ionizující záření o energii vyšší než 5 keV (rentgenové přístroje a urychlovače sloužící k ozařování zářeními gama a elektrony) [1].

Atom

Atom se skládá z protonů a neutronů umístěných v jádře, a elektronů umístěných v obalu.

Jádra atomů jednoho prvku mají stejný počet protonů (tzv. protonové nebo atomové číslo zapisované vlevo dole před značku prvku). Pokud se liší počet neutronů, jedná se o izotop.

Nukleonové číslo značí součet protonů a neutronů, zapisuje se vlevo nahoru před značku prvku. Při zápisech izotopů je možné protonové číslo vynechat.

Např. vodík H má 7 izotopů, všechny se skládají z jednoho protonu, ale jiného počtu neutronů:

^1H - nejjednodušší atom ve vesmíru, tvořený jedním protonem a jedním elektronem;

Protium

^2H - jádro obsahuje jeden proton a jeden neutron; Deuterium

^3H - jádro obsahuje jeden proton a dva neutrony; Tritium

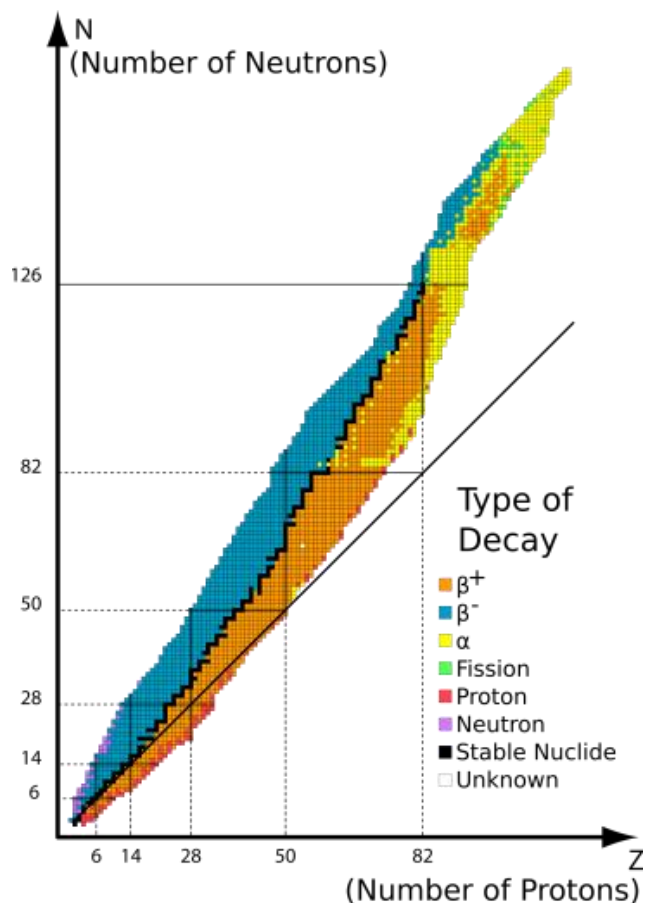
^4H - jádro obsahuje jeden proton a tři neutrony

^5H - jádro obsahuje jeden proton a čtyři neutrony

^6H - jádro obsahuje jeden proton a pět neutronů

^7H - jádro obsahuje jeden proton a šest neutronů

Radioaktivitou rozumíme samovolnou přeměnu jádra atomu za předem definovanou dobu. Poločas rozpadu je časem, za který z původního počtu jader zůstane polovina. Stabilní izotopy mají vhodný poměr mezi protony a neutrony, a proto nedochází k jejich samovolnému rozpadu. Pro zobrazení izotopů se využívá např. tzv. mapa izotopů; jedná se o graf obsahující všechny prvky a jejich izotopy periodické tabulky prvků. Každý řádek představuje jeden prvek, ve sloupcích jsou pak zaznačeny izotopy s možností zobrazení jejich dalších vlastností. Černým orámováním jsou pak vyznačené stabilní izotopy, ostatní můžeme označit jako radioaktivní. Jednotlivé izotopy mají stejné chemické vlastnosti, ale liší se fyzikálními vlastnostmi (stálost jádra atomu, hmotnost).



Obrázek 1: Mapa izotopů [2]

1.1 TYPY PŘEMĚN

Rozlišujeme tři základní typy radioaktivní přeměny jádra: alfa, beta a gama. Přeměňující se jádro bývá nazýváno mateřským jádrem, jádro vzniklé přeměnou pak dceřiné. Sekvenci přeměny nazýváme přeměnovou řadou. To, jakým způsobem a na co se jádro přemění, je dáno poměrem protonů a neutronů, jedná se o samovolný proces.

Alfa přeměna - Částice α se skládá ze dvou protonů a dvou neutronů, jde tedy o jádro helia. Vzhledem k tomu, že tyto čtyři nukleony mají velkou vazebnou energii, chová se jejich seskupení jako jedna částice. Částice α nese vzhledem k přítomnosti dvou protonů dva kladné elementární náboje. Po přeměně α vzniká dceřiné jádro, které se v periodickém systému prvků nachází o dvě místa vlevo od původního mateřského jádra [3]. Před alfa zářením se lze snadno ochránit celou řadou materiálů, účinná je i tenká textilní

vrstva z přírodních nebo chemických vláken. V případě vdechnutí částic však živé tkáni žádnou ochranu neposkytují.

Beta přeměna - Při přeměně β^- se hmotnostní číslo prvku nemění, protonové číslo se zvětší o 1. Prvek se posune o jedno místo vpravo v periodické soustavě prvků. Jádro mateřského radionuklidu emituje elektron. Vzhledem k tomu, že elektrony v jádře nejsou, předchází β^- rozpadu přeměna neutronu v jádře na proton, elektron a antineutrino. Při přeměně β^+ se hmotnostní číslo prvku nezmění, protonové číslo se zmenší o 1. Prvek se posune o jedno místo vlevo v periodické soustavě prvků. Jádro emituje pozitron, který vzniká přeměnou protonu v jádře na neutron, pozitron a neutrino [3]. Tenký hliníkový plech nebo plexisklo funguje jako dostatečné stínění, ve vzduchu se pohltí do 3 metrů. Běžný oděv toto záření pohltí jen částečně.

Gama přeměna - Záření γ je elektromagnetické záření (fotony) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu 10^{-11} až 10^{-13} m. Vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivní přeměně přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, přičemž se jádro zbavuje své excitační energie [3]. Je ze všech záření nejpronikavější, lze jej oslabit silnou vrstvou materiálu obsahující jádra těžkých prvků, např. olovem nebo betonem s příměsí barytu, ale nelze jej zcela odstínit. Se zvyšující vzdáleností se snižuje intenzita záření, nicméně se jedná řádově o kilometry.

Rentgenové záření

Rentgenové záření je forma elektromagnetického záření o vlnových délkách 10 nanometrů až 100 pikometrů, proud fotonů, o energii řádově desítek až stovek keV. Jako základní zdroj rentgenového záření slouží rentgenka. Jedná se o formu ionizujícího záření a jako takové může být nebezpečné. Při dopadu rentgenových fotonů (fotony o energii používané v radiodiagnostice, tj. 20 - 150 keV) na lidské tělo nebo materiál obecně může dojít k tomu, že [4]:

- foton se absorbuje (jedná se o přenos energie na atomy materiálu) v průběhu jedné nebo více interakcí - v rentgenovém obraze vznikají světlá místa; je zprostředkována interakcí, která se nazývá fotoelektrický jev; fotoefekt je interakce, která je v radiodiagnostice žádoucí, protože tvoří kontrast v obraze.

- foton se rozptýlí v průběhu jedné nebo více interakcí - neprodukuje žádnou užitečnou informaci v obraze; probíhá jako koherentní rozptyl - Rayleighův rozptyl nebo jako nekoherentní rozptyl - Comptonův rozptyl. Při energiích mimo radiodiagnostiku (řádově MeV) dochází i k tvorbě pozitron-elektronových párů.
- foton projde materiálem bez interakce - produkuje tmavší šedá místa v obraze

1.2 INTERAKCE GAMA ZÁŘENÍ S HMOTOU

Gama záření reaguje s materiály třemi hlavními způsoby: fotoelektrickým jevem, Comptonovým jevem a vznikem elektron-pozitronového páru. Proces, při kterém se jeden nebo více elektronů uvolní z mateřského atomu, nazýváme ionizací. Jsou-li elektrony pouze vybudeny na vyšší energetickou hladinu a potom se atom vrací zpět do základního stavu, nazýváme proces excitací.

Ionizujícím zářením rozumíme částice, které se šíří prostředím a jsou schopné vyvolat ionizaci atomů nebo molekul prostředí. Interakcí se mění energie nebo směr dopadající částice, nebo obojí, částice může být i absorbována, a může dojít k emisi jedné nebo více sekundárních částic. Změny, ke kterým dojde ve svazku záření po jeho průchodu látkou, jsou v ochraně před zářením důležité například u otázek stínění [5].

Fotoelektrický jev – elektrony jsou vyzařovány (emitovány) z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření, viditelné světlo). Emitované elektrony jsou označovány jako fotoelektrony. Dojde k úplné absorpci fotonu vázaným elektronem atomového obalu a k následnému uvolnění elektronu z obalu. Místo po emitovaném elektronu se znovu zaplní elektronem ze vzdálenější slupky obalu za současné emise charakteristického záření [5].

K fotoefektu dochází na vázaných elektronech. U volných elektronů by při fotoefektu nebyly zachovány zákony energie a hybnosti. Proto při interakci fotonu s energií blízkou vazebné energii elektronu dochází k maximální účinnosti zeslabení.

Comptonův rozptyl - Je to interakce fotonů gama záření s volnými nebo jen velmi slabě vázanými elektrony. Foton gama záření předá část své energie volnému elektronu a posune ho na vyšší energetickou hladinu. Rozptýlený foton pak s nižší energií (tj. větší vlnovou

délkou) pokračuje v pohybu v odlišném směru. Rozptyl sekundárních fotonů kolísá v intervalu 0° až 180° a jejich energie je závislá na úhlu rozptylu. Comptonův rozptyl je převládajícím typem interakce gama záření středních energií s látkami s malým protonovým číslem. Pro úhel $\psi = 180^\circ$, tedy pro zpětný rozptyl, je pokles energie primárního fotonu největší. Děj se může několikrát opakovat, až foton ztratí tolik energie, že převládne pravděpodobnost jeho zániku fotoelektrickým jevem [3].

Tvorba elektron-pozitronových párů - uplatňuje se při vysokých energiích záření γ a u absorpčních materiálů s vysokým protonovým číslem. Dochází k tomu, že v blízkosti atomového jádra nebo jiné částice se energie elektromagnetického záření zcela přemění na elektron a pozitron s kinetickými energiemi E_e a E_p . Přítomnost jádra nebo třetí částice je nutná k převzetí části hybnosti fotonu, protože součet hybností vzniklého páru elektron-pozitron je menší. K tomuto typu interakce je nezbytné, aby energie fotonu záření γ byla větší než energie odpovídající dvěma klidovým hmotnostem elektronu, tedy větší než $2 \times 0,51 \text{ MeV} = 1,02 \text{ MeV}$. Prakticky však dochází k tomuto typu interakce až při energiích značně vyšších. Vzniklé částice (elektron a pozitron) ztrácejí pak dále svou kinetickou energii ionizací a excitací atomu prostředí. Když pozitron sníží svou energii až na hodnoty odpovídající rychlostem tepelného pohybu, spojí se s libovolným elektronem, přičemž se jejich hmotnost přemění na energii elektromagnetického záření. Nejčastěji vznikají dvě kvanta záření, každé o energii $0,51 \text{ MeV}$, odpovídající energetickému ekvivalentu klidové hmotnosti elektronu. Tato kvanta se pohybují vzájemně opačným směrem. Doba života pozitronu je kolem 10^{-7} s [3].

1.3 BIOLOGICKÉ ÚČINKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Ozáření člověka může vyvolat chorobné změny projevující se v průběhu dnů, týdnů, ale i roků až desetiletí. Účinky ionizujícího záření rozlišujeme na deterministické a stochastické.

Deterministické účinky

Pro deterministické účinky je charakteristická závislost na dávce - intenzita projevů a zdravotních komplikací je dána dávkou. Akutní nemoc z ozáření se v současné době nevyskytuje, jedná se např. o účinky jaderných útoků během druhé světové války nebo během nehod reaktorů např. v Černobyli v roce 1986 nebo v japonské Fukušimě v roce

2011. Lokální poškození kůže (akutní radiační dermatitida) je způsobeno jednorázovým lokálním ozářením nebo kontaminací kůže beta zářiči, jedná se o zarudnutí kůže až vznik těžko hojitelných vředů. Velmi nepříjemným důsledkem ozáření je porucha vývoje lidského plodu a u mužů neplodnost.

Stochastické účinky

Stochastické účinky jsou důsledkem změn v buňkách, které přežily předchozí ozáření. Změněná buňka může, po různé dlouhé době, iniciovat nádor. Organismus je sice schopen, při malých dávkách, obnovit poškozené buňky, avšak nejsou známy hodnoty dávky, pod kterými by nádor nevznikl. Náhodný charakter mají i dědičné účinky ozáření projevující se u potomstva ozářených osob. Deterministickým účinkům ionizujícího záření lze zabránit snížením dávky (resp., že dávka nepřekročí prahovou hodnotu daného účinku), vznik stochastických účinků nelze zcela vyloučit, stanovit lze pouze pravděpodobnost jejich vzniku [6].

Vliv ionizujícího záření je výraznější, pokud je buňka málo diferencovaná a je schopna se rychle množit. Například na začátku vývoje organismů je buňka na ozáření nejcitlivější. Proces účinku ionizujícího záření probíhá ve čtyřech etapách - fyzikální (předání energie atomům), fyzikálně-chemické (vznik volných radikálů), chemické (vzniklé radikály reagují s DNA, RNA, enzymy, proteiny a přitom mění jejich složení a funkci) a biologické. Při menších dávkách záření nedochází k usmrcení buňky, ani k zástavě buněčného dělení [6].

1.4 OCHRANA PŘED IONIZUJÍCÍM ZÁŘENÍM

Vzdálenost - se vzdáleností od zářiče klesá dávkový příkon, pro každý druh záření se jedná o jinou závislost. Intenzita záření a tím i dávkový příkon jsou nepřímo úměrné druhé mocnině vzdálenosti od zdroje záření.

Čas - zkrácení doby ozařování na minimum, případně na nejkratší možnou dobu, zkrácení pobytu v okolí zářiče, obdržaná dávka je totiž při konstantních tocích přímo úměrná době expozice.

Stínění - pro každý druh záření je vhodný jiný absorbující materiál a tloušťka. Stínit je možné buď zářič, nebo osobu [3].

Pracoviště s ionizujícím zářením

Mezi místa s výskytem ionizujícího záření patří pracoviště s otevřenými nebo uzavřenými zářiči nebo místa jejich uložení. Jsou to především jaderná zařízení, radioterapeutická pracoviště, oddělení nukleární medicíny, defektoskopická pracoviště.

Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. O radiační ochraně, §12 až §15 stanovuje 4 základní kategorie pracovišť, kde se vykonávají radiační činnosti, od pracoviště I. kategorie (pracoviště s drobnými typově neschválenými zdroji ionizujícího záření, pracoviště s veterinárním, zubním nebo kabinovým rentgenovým zařízením), až po pracoviště IV. kategorie, kterým je jaderné zařízení, úložiště radioaktivních odpadů nebo sklad vyhořelého paliva [7].

2. OBLEKY

2.1 SOUČASNÝ STAV OSOBNÍ OCHRANY PROTI ÚČINKŮM IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Níže uvedení výrobci se věnují vývoji a výrobě osobních ochranných prostředků proti účinkům IZ. Při výrobě používají nejmodernější technologické postupy a jako stínící materiál využívají různé směsi těžkých kovů.

Radiation Shield Technologies, USA



Obrázek 2: Celotělový oblek z materiálu Demron [12]

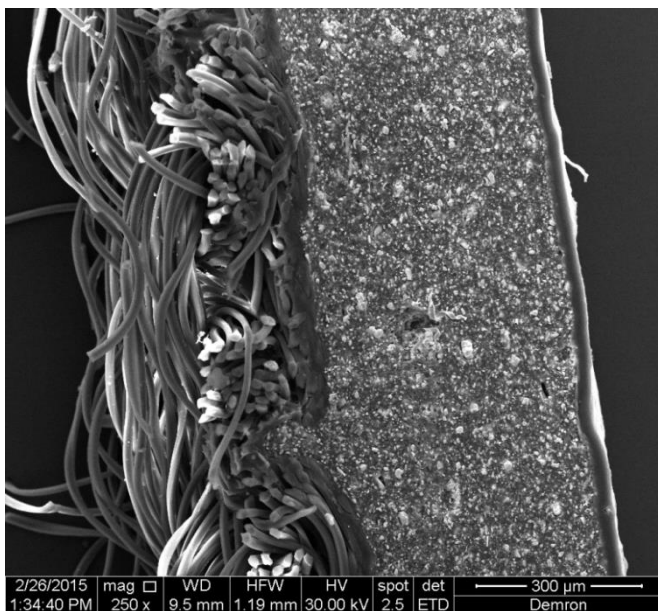
Americká Radiation Shield Technologies (RST) je jedním z lídrů v oblasti výzkumu, konstrukce a výrobě ochranných prostředků proti ionizujícímu záření. Technologie Demron TM je speciálně navržena tak, aby spojovala ochrannou funkci a zároveň byla jednoduchá a rychle připravena k použití. Váha obleků, snadná manipulace s nimi a neomezená pohyblivost v nich je hlavní, na co se RST soustředí. Díky úzké spolupráci s koncovými uživateli vyvíjí nové standardy v oblasti ochrany proti ionizujícímu záření a zaměřuje se na efektivní ochranu proti kontaminaci. Vývoj technologie Demron TM trval více jak 10 let a samotnou společností je představována jako jediná možnost, jak se skutečně ochránit před ionizujícím zářením. V počátcích výzkumu se společnost zaměřila na pracovníky v medicíně a pacienty, nyní se však věnuje vývoji ochranných pomůcek pro všechny, kdo jsou ohroženi pronikavým zářením [8].

Demron je textilie snižující důsledky ionizujícího záření. Jedná se o technologii podobnou olověnému stínění, nicméně textilie je „lehká“ a ohebná. Složení je proprietární, ale je popisován jako netoxický polymer s příměsí bismutu, wolframu, barya, boru, titanu, tantalu a thoria v různých formách. Demron chrání před ionizujícím zářením, může však být zkombinován s materiály chránícími proti chemickým a biologickým negativním účinkům. Technologie získala certifikát stvrzující, že textilie je schopna výrazně pohltit alfa a beta

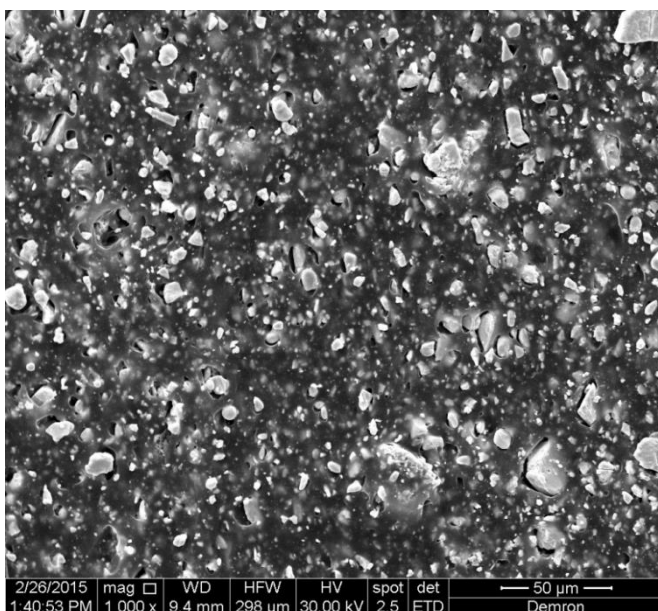
záření a snižuje emisi fotonů nízkoenergetického gama záření. Pokud se spojí více vrstev Demronu do laminátu, účinek ochranné vrstvy se zvyšuje, nicméně kompletního pohlcení gama záření se i tak nedosáhne.

Stínící vrstvou je vodu a vzduch nepropouštějící polymerový kompozit z polyetylenu a polyvinylchloridu a anorganických solí s vysokým atomovým číslem, jeho hustota je 2,43 - 3,14 g/cm³, má vynikající tepelnou vodivost. Stínící vrstva je zalaminována mezi dvě vrstvy textilního materiálu [8].

Analýzou bylo zjištěno, že ve stínící vrstvě je nejvíce obsažen uhlík a bismut, ve stopovém množství pak další těžké kovy jako wolfram nebo platina. Z řezu textilie je možné vyčíst, že se jedná o tři vzájemně spojené vrstvy. Nosná vrstva je vyrobena z teplotně stabilního polyamidu 6,6 (nylon), který má vynikající odolnost v otěru a je stálá vůči chemikáliím a biologickým vlivům. Svrchní vrstva je polymer polytetrafluorethylen (PTFE, teflon), který zajišťuje mimo jiné i ochranu proti ultrafialovému záření.



Obrázek 3: Řez textilií Demron - osnovní, útkové nitě, stínící vrstva s kovovými částicemi, zátěr na rubové straně, zvětšeno 250x¹



Obrázek 4: Detail zátěru textilie Demron s rozptýlenými částicemi těžkých kovů, zvětšeno 1000x

¹ SEM (scanning electron microscope) je mikroskopem, který využívá k zobrazení pohyblivého svazku elektronů. Interakcí dopadajících elektronů s materiálem vzorku vznikají různě detekovatelné složky. Jak paprsek putuje po vzorku, mění se podle charakteru povrchu úroveň signálu v detektoru. Z těchto signálů je pak sestavován výsledný obraz. Použitím elektronového mikroskopu je možné dosáhnout velké hloubky ostroty, až téměř trojrozměrného formátu. Výstupem ze SEM je tzv. prvkové spektrum. SÚJCHBO, v.v.i. zajistilo vypracování analýz spektra v rámci projektu VG20132015105 a hrubé výsledky byly poskytnuty k vypracování diplomové práce.

Demron je patentově chráněn a jeho složení není známé. Analýzou lze získat poměr jednotlivých prvků obsažených ve hmotě, postup výroby je však neznámý.

Teijin Limited, Japonsko



Obrázek 5: Technora fabric [9]

Japonská společnost zaměřující se především na textilní průmysl - speciální vlákna, kompozity, elektricky vodivé materiály, polymery, zpracování plastů na textilní vlákna, polyesterové textilní suroviny. V roce 2013 představili nový materiál, Technora, který snižuje účinky rentgenového a gama záření. Jedná se o směs wolframových částic a vysoko pevnostních para-aramidových vláken, které vyrábí a prodává Teijin. Přidanou hodnotou je i odolnost vůči vysokým teplotám, takže ochranné oděvy mohou používat zaměstnanci veškerých záchranných složek. Technora má vynikající pevnost v tahu, je odolná vůči chemikáliím a tekutinám, vyniká rozměrovou stabilitou a dobrou tepelnou vodivostí. Pevná a vysoce orientovaná molekulární struktura zaručuje nepatrnou trvalou deformaci.

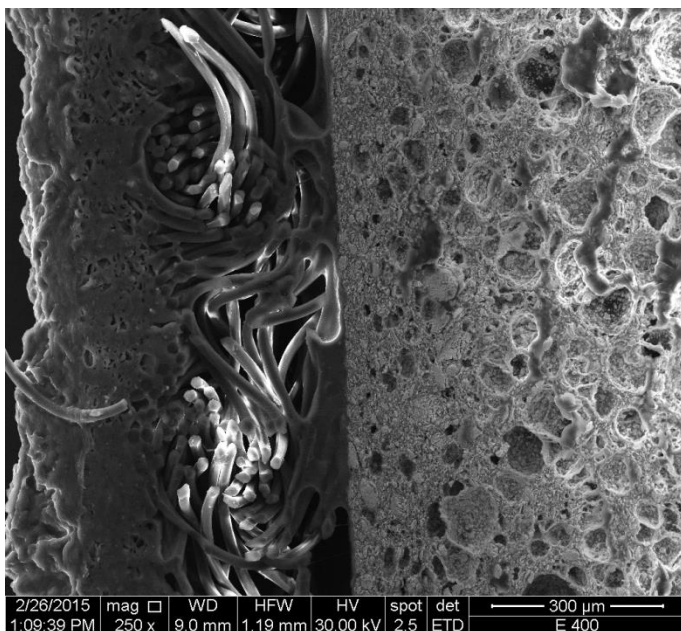
Yamamoto Corporation, Japonsko



Obrázek 6: Biorubber RSM [10]

Významná japonská společnost zaměřující se na výrobu a inovaci gumy a výrobků z gumy, jako jsou neoprenové obleky, medicínské ochranné prostředky, obleky pro speciální armádní jednotky, elektricky vodivé pěny. Po havárii v jaderné elektrárně ve Fukušimě začali intenzivně pracovat na vývoji materiálu, který by snižoval účinky radioaktivního záření. Výsledkem jsou dva typy stínících oděvů, které by měly ochránit před beta a gama zářením. Jedná se o celé obleky, kombinézy, a také o díly chránící konkrétní části těla [10]. Stínící vrstvou je **BIORUBBER RSM** – vodotěsný elastický materiál, součástí jsou speciálně upravená uhlíková vlákna. Společnost Yamamoto uvedla na trh několik typů

textilií - E300, E400, E600 o tloušťce 3 mm a 6 mm E600. BIORUBBER RSM E600 - tvořena slitinami těžkých kovů (především olova), které jsou rozptýlené v syntetickém materiálu s pravidelnou plástvovou strukturou uzavřených buněk, tvořených vysoce čistým vápencem.



Obrázek 7: Detail textilie Biorubber RSM E400, osnovní a útkové nitě, zátěr na lícni i rubové straně, zvětšeno 250x

Analýza prokázala, že nejvíce obsaženým prvkem v materiálech Biorubber je olovo, dále pak uhlík a kyslík. Ve stopovém množství se objevuje lanthan a chlor. Textilie testované vesty se skládá ze tří vrstev. Stínící vrstva je houbovitě struktury s rozptýlenými částicemi olova. Další vrstvou je tkaná textilie složená z multifilů šestiúhelníkového tvaru, plátňová vazba. Svrchní zátěr je voděodolný.

Fire & Technical Association "PTS", Rusko

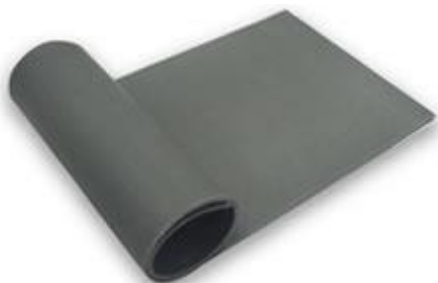
Ruský výrobce a dodavatel ochranných oděvů, požární a záchranářské techniky, veškerých zařízení v oblasti bezpečnosti v průmyslu a dýchacích přístrojů. Ochranný oděv prodáváný pod názvem RZK byl vyvinut pro hasiče a chrání před beta a nízkoenergetickým gama zářením, horkem a vysokými teplotami. Snižuje účinek záření na lidské orgány a umožňuje prodloužení pobytu v prostorách se zdroji ionizujícího záření. Oblek je doporučeno kombinovat s dýchacím přístrojem. Triton je dalším z výrobků společnosti PTS, jedná se o

oděv chrání před zvýšeným radioaktivním zářením během operací pod vodou. Oděv se nosí pod potápěčskou kombinézou [11].



Obrázek 8: oblek RZK [11]

Alpha Technical Research Co., Ltd, Japonsko



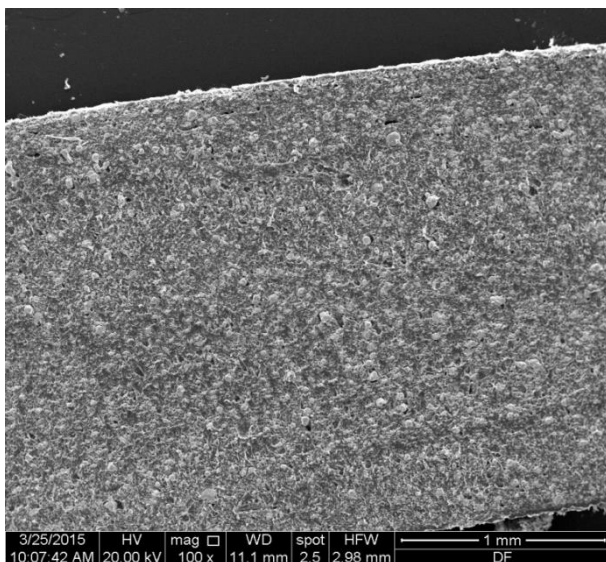
Obrázek 9: DF Sheet [4]

Jedná se o japonského výrobce a prodejce zařízení pro průmysl, s širokým okruhem působnosti. DF Sheet je plošná textilie vyráběná v šířích 300 a 600 mm, délce 1000 mm, s tloušťkou 0,3 - 3,5 mm. Materiál lze využít jako stínění v jaderných elektrárnách, pracoviště s jadernými zářiči nebo stínění v medicíně. Z materiálu lze vyrobit jakýkoliv tvar ochranného obleku, protože je flexibilní, lze jej

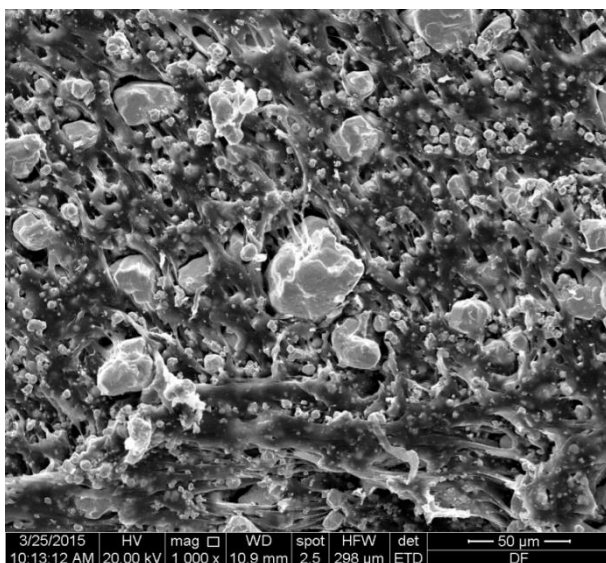
stříhat nůžkami nebo rozřezat nožem.

Obsahuje hlavně je wolfram - ekvivalentní tloušťka 0,5, 1, nebo 2 mm Pb, zakomponovaný

do pryskyřice, hustota 8 g/cm^3 , stínící vrstva z obou stran zalaminována do nylonu o tloušťce 0,5 mm [12].



Obrázek 10: řez materiálem DF Sheet, zvětšeno 100x



Obrázek 11: Detail houbovité struktury DF Sheet, zvětšeno 1000x

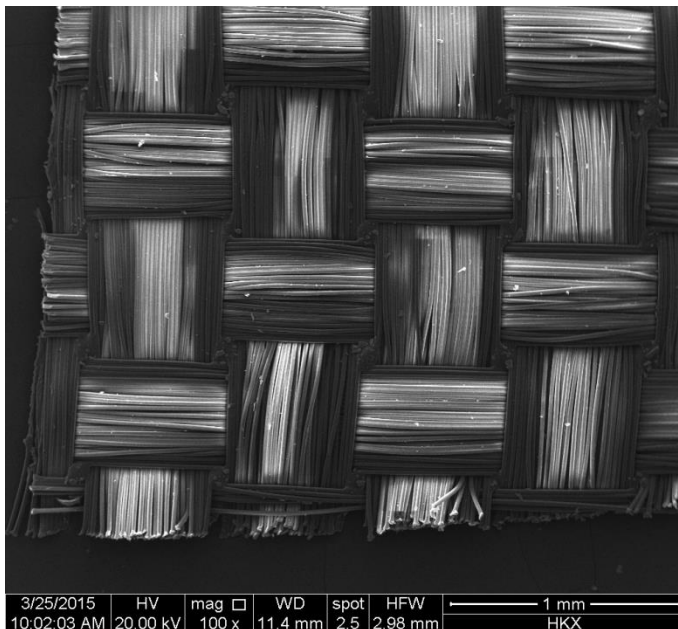
Guangzhou Yueshen Import & Export Co., Ltd., Čína

Oblek s názvem YSX1558 snižuje účinky ionizujícího záření celé tělo. Stínící vrstvu tvoří sloučeniny olova – ekvivalent 0,25 mm Pb, rozptýleny v gumě [13].

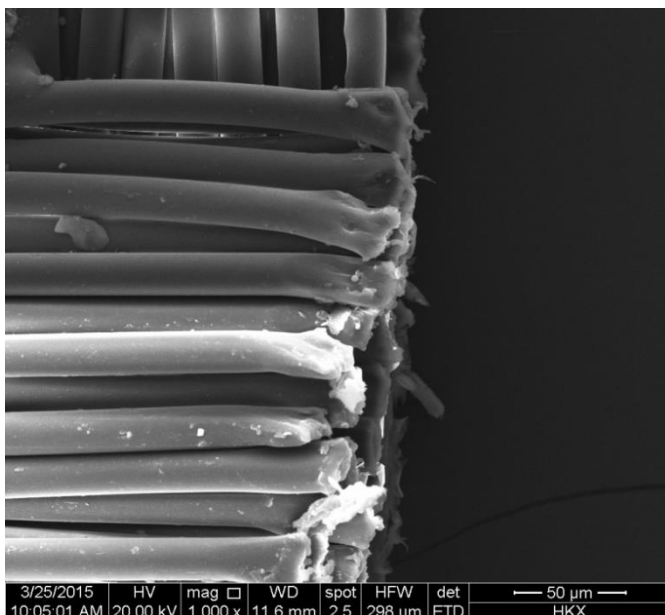


Obrázek 12: Nuclear Radiation Overall Protection Wear (YSX1558) [9]

Elektronovým rastrovacím mikroskopem byly pořízeny snímky povrchu obleku. Jedná se o multifil v plátnové vazbě, v osnově i útku stejný. Dostava 160 nití/ 100 mm, čtvercová dostava. Analýzou bylo zjištěno složení vláken: uhlík a kyslík jako převažující prvky, dále pak stopové množství hořčíku, hliníku a titanu. Tkaná vrstva je využívána jako ochrana samotné stínící vrstvy. Uhlík není schopen odstínit beta ani gama záření, samotná tkaná vrstva zastaví alfa záření.

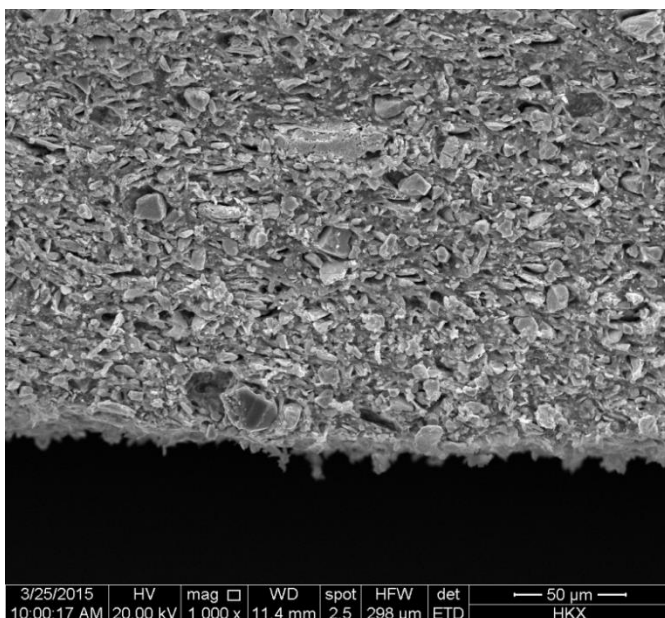


Obrázek 13: Povrch YSX1558, zvětšeno 100x



Obrázek 14: Detail řezu vláken povrchu YSX1558, zvětšeno 1000x

Nejdůležitější částí ochranného obleku je samotná stínící vrstva. Analýzou bylo ve vzorku zjištěno zastoupení zejména olova, a to téměř 30% obsahu. Další identifikované prvky jako hořčík, křemík a mangan tvoří pojivo. Tyto prvky zajišťují, že oblek je nositelný, přiměřeně lehký a poskytuje dostatek komfortu při nošení. Se zvyšujícím se obsahem olova se sice zlepšuje schopnost materiálu odstínit gama záření, avšak na úkor komfortu nošení.



Obrázek 15: Stínící vrstva YSX1558, zvětšeno 1000x

2.2 TRENDY VE VÝVOJI NOVÝCH OCHRANNÝCH ODĚVŮ

Snížení tloušťky ochranné vrstvy

Čím větší je tloušťka stínícího materiálu, tím lépe oblek chrání proti všem druhům záření. Nicméně se vzrůstající tloušťkou stínící vrstvy roste zásadně i hmotnost obleku. Pro stínění se používají kovy těžkých prvků, jako například olovo (hustota $11\,340\text{ kg/m}^3$) nebo wolfram (hustota $19\,300\text{ kg/m}^3$) [1].

Snižování hmotnosti obleků

Běžné, cenově dostupné ochranné obleky, jejichž hlavní ochrannou vrstvou je olověný plech umístěný mezi dvěma vrstvami textilie, jsou velmi těžké. Pro oblek chránící horní polovinu těla, je třeba počítat s plátem olova dostatečně velkým na to, aby kryl záda a hrudník, tzn. minimálně $0,25\text{ m}^2$, tloušťky $0,5\text{ mm}$ vepředu a $0,25\text{ mm}$ na zádech. Při dané hustotě olova se jedná o oblek o hmotnosti cca 3 kg (+ textilní materiál), podle požadované velikosti. Pokud se jedná o celotělový oblek, který chrání i spodní polovinu těla, hmotnost obleku se i ztrojnásobí. Z důvodu nadměrné zátěže ramen se častěji využívá oblek rozdělený na část kryjící horní a dolní část těla zvlášť, váha obleku je tak více rozložena. Bez těchto obleků se neobejdou např. lékaři, pracovníci s rentgenovým zářením. Není předpokladem, že zdravotní personál má během lékařského vyšetření zvýšenou fyzickou aktivitu, nicméně na specializovaných pracovištích tráví lékaři a sestry v oblecích denně i několik hodin. Oblékání a sundávání ochranných vest se tak stává, hlavně pro ženy, fyzicky náročné.

Nové materiály s ochrannou funkcí

Ochrana proti účinkům ionizujícího záření je dostatečná vzdálenost od zdroje záření, co nejkratší čas strávený v oblasti s ionizujícím zářením a vhodné, resp. funkční stínění. Pokud není možné zkrátit čas pobytu v těsné blízkosti zářiče, je nutné dostatečně chránit tělo. V současné době se jako ochrana proti gama záření využívají materiály s vysokou hustotou – hlavně olovo ($11\,300\text{ kg/m}^3$), wolfram ($19\,300\text{ kg/m}^3$), bismut ($9\,800\text{ kg/m}^3$), případně v kombinaci s aramidovými vlákny. Vysoká hustota však znamená vyšší váhu obleku. Ideální vlákno (materiál) pro obleky je takové, které je schopné odstínit vysoce energetické

gama záření, ale není těžké. Pozitivní je, pokud jej lze jednoduše a levně vyrobit. Důležitým faktorem při výběru prvků je jejich toxicita. U obleků se sice nepředpokládá, že by byly určeny na nahé tělo, nicméně oděv obsahující nebezpečné látky může člověku zdravotně uškodit.

Jednoduchá údržba

Na textilní vrstvy, mezi které je vkládán u levnějších obleků olověný plát, jsou kladeny vysoké nároky na pevnost a odolnost. Jedná se o tkaniny z odolných vláken, speciální vazby, případně o netkané textilie. Olověné pláty jsou do obleků zašity a zalepeny napevno, není možné je vyjmout a oblek vyčistit běžným způsobem. V praxi se proto přes obleky proti ionizujícímu záření používá ještě kombinéza chránící oblek samotný. Jedná se např. o výrobky firmy DuPont - Tychem® nebo Tyvek® pro jednorázové použití. Materiál Demron je však dle výrobce možné udržovat jako klasickou textilií – obleky lze prát a jsou skladné. Tuto vlastnost ocení hlavně hasiči, policie, armáda nebo složky zasahující v případech jaderných havárií (např. ve Fukušimě).

Komfort nošení

Se vzrůstající hmotností obleků chránících proti ionizujícímu záření klesá i pohodlí, se kterým se oblek obléká a používá. Hůře se v obleku pohybuje, součástí bývají i těžké rukavice, díky kterým je jemná manipulace s menšími předměty téměř vyloučena. Detašované pracoviště Státního úřadu jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. v rámci výzkumného programu testuje dostupné obleky chránící proti IZ v zátěži - testované osoby v obleku podstupují řadu fyzicky méně náročných úkolů (v klimatické komoře), během kterých je jim měřena teplota tělesného jádra, povrchová kožní teplota, krevní tlak, srdeční frekvenci, potní ztráty, celková ztráta tělesné hmotnosti. Velký důraz je také kladen na subjektivní hodnocení testovanými osobami. Testování ukazuje, že i když má jedinec oblečené funkční spodní prádlo a na něm jeden z nejmodernějších obleků proti účinkům ionizujícího záření, po vysvlečení je kompletně mokrý, zpocený.

2.3 TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI VYBRANÝCH OBLEKŮ

V souvislosti s komfortem nošení obleků bylo v rámci diplomové práce provedeno měření tepelně izolačních vlastností obleků z materiálu Biorubber. Proměřeny byly 4 vzorky různé tloušťky, hmotnosti a povrchového vzhledu.

Tabulka 1: Značení vzorků

Vzorek č.	3	4	5	6
Biorubber No.	E300	E400	E600 3 mm	E600 6 mm

Tabulka 2 obsahuje základní konstrukční parametry testovaných vzorků Biorubber - tloušťku vzorku, velikost, plošnou hmotnost a objemovou měrnou hmotnost. Jedná se o materiály s velmi velkou hustotou a plošnou hmotností - nejsilnější vzorek má zjištěnou plošnou hmotnost 27,949 kg/m².

Tabulka 2: Konstrukční parametry materiálu Biorubber

vzo rek	Tloušťka textilie h [mm]	Velikost vzorku [m ²]	Plošná hmotnost textilie [kg/m ²]	Objemová měrná hmotnost textilie [kg/m ³]
3	4,595	0,117	5,239	1 140
4	4,547	0,117	7,197	1 582
5	4,915	0,117	15,274	3 107
6	9,651	0,117	27,949	2 895

Měřicí zařízení FX300

Elektronický přístroj FX300 je zařízením k měření propustnosti textilií pro vzduch. Princip spočívá ve vytvoření tlakového rozdílu mezi oběma povrchy testovaného materiálu a měřením toku takto vyvolaného vzduchu [14]. Měření proběhlo dle normy ČSN ISO 9237, tlak 200 Pa pro technické plošné textilie, testovací plocha 20 cm².

Tabulka 3: Propustnost textilií pro vzduch [l/(m²·s)]

Propustnost textilií pro vzduch [l/(m²·s)]				
vzorek	3	4	5	6
průměr	2,7150	0,2620	0,2786	10,1160
směrodatná odchylka	0,084	0,0058	0,029	0,64
rozptyl	0,0071	0,0000	0,0009	0,4159
variační koeficient	0,0311	0,0222	0,1075	0,0638

Vzhledem k tloušťce a povaze materiálu je nutné upozornit na naměřené výsledky u materiálu číslo 6 - Biorubber E600 o největší průměrné tloušťce 9,651 mm. Ze všech testovaných vzorků vykazuje nejvyšší prodyšnost, a to cca 10 litrů vzduchu/(m²·s). Z hlediska oděvních textilií je tato hodnota srovnatelná s větru odolnými funkčními materiály. Zajímavé je také porovnání tloušťky materiálu (nebo jejich plošné hmotnosti) s propustností vzduchu: se vzrůstající tloušťkou materiálu se zvyšuje hodnota propustnosti.

Přístroj Alambeta

Přístroj Alambeta je určen k měření termofyzikálních vlastností textilií a netextilních materiálů. Pomocí přístroje ALAMBETA je možno měřit řadu vlastností textilií, jako je tepelná vodivost λ , tepelná jímavost b , tepelný odpor r , tloušťka materiálu h , teplotní vodivost a , dále pak max. tepelný tok q nebo poměr maximálního a ustáleného tepelného toku p .

Podstata měření spočívá v průchodu tepelných toků povrchy vzorku od neustáleného stavu k ustálenému. Je to počítačem řízený přístroj, který automaticky spočítá veškeré parametry měření a obsahuje autodiagnostický program, který zabraňuje chybným měřením.

Aby se dosáhlo co nejlepšího měření, je třeba vzorky zbavit veškerých nečistot a měřit v místech bez přehybů nebo zvlnění. Každým měřením se měřené místo zahřeje, proto je nutné buď vybrat jiné místo, nebo počkat, až materiál vychladne [14].

Pro statistické zpracování je třeba změřit vzorek 3 - 20x. Lze zjistit aritmetický průměr, variační koeficient, směrodatnou odchylku a interval spolehlivosti při 95% hladině významnosti.

Změřeny byly 4 vzorky materiálu Biorubber, označeny byly čísla 3 až 6. Laboratorní klimatické podmínky: 21°C, vlhkost 35%. Testování proběhlo dle normy ČSN EN 20811 (80 0818). Jako problémový faktor se ukázala být velikost vzorků (0,3 m x 0,39 m). Při jejich položení na snímač tepelného toku přesahovaly okraje textilií přes základnu přístroje. Díky hmotnosti, tuhosti a tloušťce materiálů se měřená část vzorku vypoučila, nadzvedla hlavici a přístroj poté vykazoval chybu v měření („příliš velká tloušťka materiálu, nedostatečný kontakt hlavice / materiálu / snímače tepelného toku“).

Měrná tepelná vodivost λ

Představuje množství tepla, které proteče jednotkou délky za jednotku času a vytvoří rozdíl teplot 1 K. Jinými slovy je to výkon (teplo za jednotku času), který projde každým čtverečním metrem desky tlusté metr, jejíž jedna strana má teplotu o 1 kelvin vyšší než druhá. Pro obleky je z hlediska nošení výhodná co nejvyšší měrná tepelná vodivost, aby teplo přes tento materiál unikalo co nejrychleji.

Tabulka 4: Měrná tepelná vodivost λ

Měrná tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]				
vzorek	3	4	5	6
průměr	0,0884	0,1269	0,1374	0,1013
směrodatná odchylka	0,0015	0,0075	0,0205	0,0059
rozptyl	0,0000	0,0001	0,0004	0,0000
variační koeficient	0,0173	0,0595	0,1495	0,0587

Plošný odpor vedení tepla r

Udává množství tepla, které materiál nepřijímá. Čím vyšší má textilie odpor, tím méně je schopná odvádět teplo. Vyšší hodnoty tepelného odporu ukazují na dobrou schopnost materiálu udržet u těla vyprodukované teplo. Z tohoto důvodu jsou žádoucí nižší hodnoty tepelného odporu, aby nedošlo k přehřátí organismu.

$$r = \frac{h}{\lambda}, \text{ kde:} \tag{1}$$

h - tloušťka materiálu [mm]

λ - součinitel měrné tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

Tabulka 5: Plošný odpor vedení tepla r

Plošný odpor vedení tepla r [$\text{W}^{-1}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^2$]				
vzorek	3	4	5	6
průměr	0,0520	0,0360	0,0368	0,0957
směrodatná odchylka	0,0010	0,0025	0,0092	0,0092
rozptyl	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001
variační koeficient	0,0191	0,0683	0,2489	0,0960

Tepelný tok q

Množství tepla šířícího se z ruky (hlavice přístroje) o teplotě t_2 do textilie o počáteční teplotě t_1 za jednotku času. Představuje množství tepla šířící se z pokožky do materiálu. Vysoké hodnoty tepelného toku potvrzují dobrou schopnost materiálu odvádět přebytečné teplo, nízký parametr tepelného toku značí, že mnoho tepla zůstalo u těla. Opět je z hlediska komfortu vhodné, aby materiál pro výrobu obleků co nejvíce teplo odváděl.

$$q = b \cdot \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{\pi \cdot \tau}}, \text{ kde:} \quad (2)$$

t_2 - teplota hlavice (ruky) [$^{\circ}\text{C}$]

t_1 - počáteční teplota textilie [$^{\circ}\text{C}$]

b - tepelná jímavost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{K}^{-1}$]

π - konstanta

τ - doba tepelného kontaktu mezi lidskou pokožkou a textilií

Tabulka 6: Tepelný tok q

Tepelný tok q [W/m ²]				
vzorek	3	4	5	6
průměr	375	589	289	410
směrodatná odchylka	28,56	236,29	275,46	73,01
rozptyl	816,04	55837,51	75883,60	5331,60
variační koeficient	0,0761	0,4013	0,9519	0,1779

Měrná teplotní vodivost a

Vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat teplotní změny. Čím je hodnota vyšší, tím látka rychleji vyrovnává teplotu [14].

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \text{ kde:} \quad (3)$$

$c \cdot \rho$ - tepelná kapacita [J/m³]

λ - součinitel měrné tepelné vodivosti [W·m⁻¹·K⁻¹]

Tabulka 7: Měrná teplotní vodivost a

Měrná teplotní vodivost a [m ² ·s ⁻¹]				
vzorek	3	4	5	6
průměr	1,44E-07	1,42E-07	1,39E-07	2,76E-07
směrodatná odchylka	1,48E-08	3,73E-08	3,32E-08	1,63E-07
rozptyl	2,20E-16	1,39E-15	1,10E-15	2,68E-14
variační koeficient	0,10	0,26	0,23	0,59

Tepelná jímavost b

Charakterizuje tepelný omak a představuje množství tepla, které proteče při rozdílu teplot 1 K jednotkou plochy za jednotku času v důsledku akumulace tepla v jednotkovém objemu. Jako chladnější pocítujeme hmatem ten materiál, který má větší tepelnou jímavost [14].

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}, \text{ kde:} \quad (4)$$

$c \cdot \rho$ - tepelná kapacita [J/m^3]

λ - součinitel měrné tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Tabulka 8: Tepelná jímavost b

Tepelná jímavost b [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}^{-1}$]				
vzorek	3	4	5	6
průměr	233	343	375	215
směrodatná odchylka	13	47	74	61
rozptyl	166,5	2232,4	5509,5	3682,8
variační koeficient	0,05	0,13	0,19	0,28

Naměřené hodnoty tepelné jímavosti zhruba odpovídají bavlněným, vlnařským tkaninám, těžkým bavlněným tkaninám (denim). Obleky k ochraně před ionizujícím zářením nejsou určeny na nahé tělo, často jsou až nejsvrchnější vrstvou, proto není tento parametr pro komfort nošení zásadní.

2.4 TERMOFYZIOLOGICKÉ VLASTNOSTI

Přístroj PERMETEST

Přístroj měřící tepelný odpor, výparný odpor a relativní paropropustnost. Jedná se o skin model, patentován byl v roce 1990 prof. Hesem z Technické univerzity v Liberci. Lze jím měřit nedestrukčně, je možné vkládat celý výrobek, doba měření se pohybuje kolem 3 minut. Slouží k měření tepelného odporu textilií při stabilizované teplotě textilie 320°C , nebo při zvoleném rozdílu teploty hlavice a teploty v kanálu v mokřím či suchém režimu, dále k měření výparného odporu a relativní paropropustnosti textilií při izotermních podmínkách, a k měření výparného odporu a relativní paropropustnosti textilií při anizotermních podmínkách [14].

Stanovení relativní propustnosti pro vodní páry

Relativní propustnost pro vodní páry p [%] je nenormalizovaný parametr, kde 100% propustnost představuje tepelný tok q_0 , který je vyvozený odparem z vodní hladiny o

stejném průměru jako měřený vzorek. Zakrytí hladiny vzorkem se tepelný tok sníží na hodnotu q_v [14].

$$p = \frac{q_0}{q_v} \cdot 100 [\%], \text{ kde} \quad (5)$$

q_v - plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavicí zakrytou měřeným vzorkem [W/m²]

q_0 - plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavicí nezakrytou měřeným vzorkem [W/m²]

Stanovení výparného odporu

Parametr výparného odporu má mimořádně důležitou úlohu při ochlazování těla odpařováním potu z povrchu pokožky. Úroveň ochlazování závisí zejména na rozdílu parciálních tlaků vodních par na povrchu pokožky a ve vnějším prostředí a dále pak na propustnosti oděvní soustavy pro vodní páry. Místo parametru paropropustnost se dnes běžně používá parametr výparného odporu, který u měření simulujících reálné přenosové jevy při nošení oděvu přímo charakterizuje tepelné účinky vnímané pokožkou vznikající v důsledku odparu potu [14].

$$Ret = (P_m - P_a)(q_v^{-1} - q_0^{-1}), \text{ kde} \quad (6)$$

P_m - nasycený parciální tlak vodní páry na povrchu měřicí hlavičky [Pa]

P_a - parciální tlak vodní páry ve vzduchu ve zkušebním prostoru při teplotě vzduchu ve zkušebním prostoru [Pa]

q_v - plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavicí zakrytou měřeným vzorkem [W/m²]

q_0 - plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavicí nezakrytou měřeným vzorkem [W/m²]

Stanovení tepelného odporu

Tepelný odpor R_{ct} vyjadřuje odpor proti prostupu tepla vzorkem při definované teplotě t_m z jedné strany a při přenosu tepla konvekcí z jeho druhé (vnější) strany do vzduchu o teplotě t_a , přičemž tepelný odpor této vnější mezní vrstvy se odečítá [14].

$$R_{ct} = (t_m - t_a)(q_v^{-1} - q_0^{-1}), \text{ kde} \quad (7)$$

t_m - teplota povrchu měřící hlavice [$^{\circ}\text{C}$]

t_a - teplota vzduchu proudícího kanálem podél měřící hlavice [$^{\circ}\text{C}$]

q_v - plošná hustota tepelného toku procházející měřící hlavici zakrytou měřeným vzorkem [W/m^2]

q_0 - plošná hustota tepelného toku procházející měřící hlavici nezakrytou měřeným vzorkem [W/m^2]

Z důvodu tloušťky a pevnosti testovaného materiálu nebylo možno vzorky upevnit do testovací hlavice a měření nebylo provedeno. Ze stejného důvodu nebyl proveden ani spray test.

3. KATEDRA NETKANÝCH TEXTILÍ, FAKULTA TEXTILNÍ, TUL

Katedra netkaných textilií TUL se zabývá výzkumem a vývojem nanovláknenných materiálů a nanokompozitů pro nejrůznější aplikace, členové katedry jsou autory světoznámého patentu na průmyslovou výrobu nanovláken s unikátními akustickými a filtračními vlastnosti (využití v medicínských aplikacích) [15].

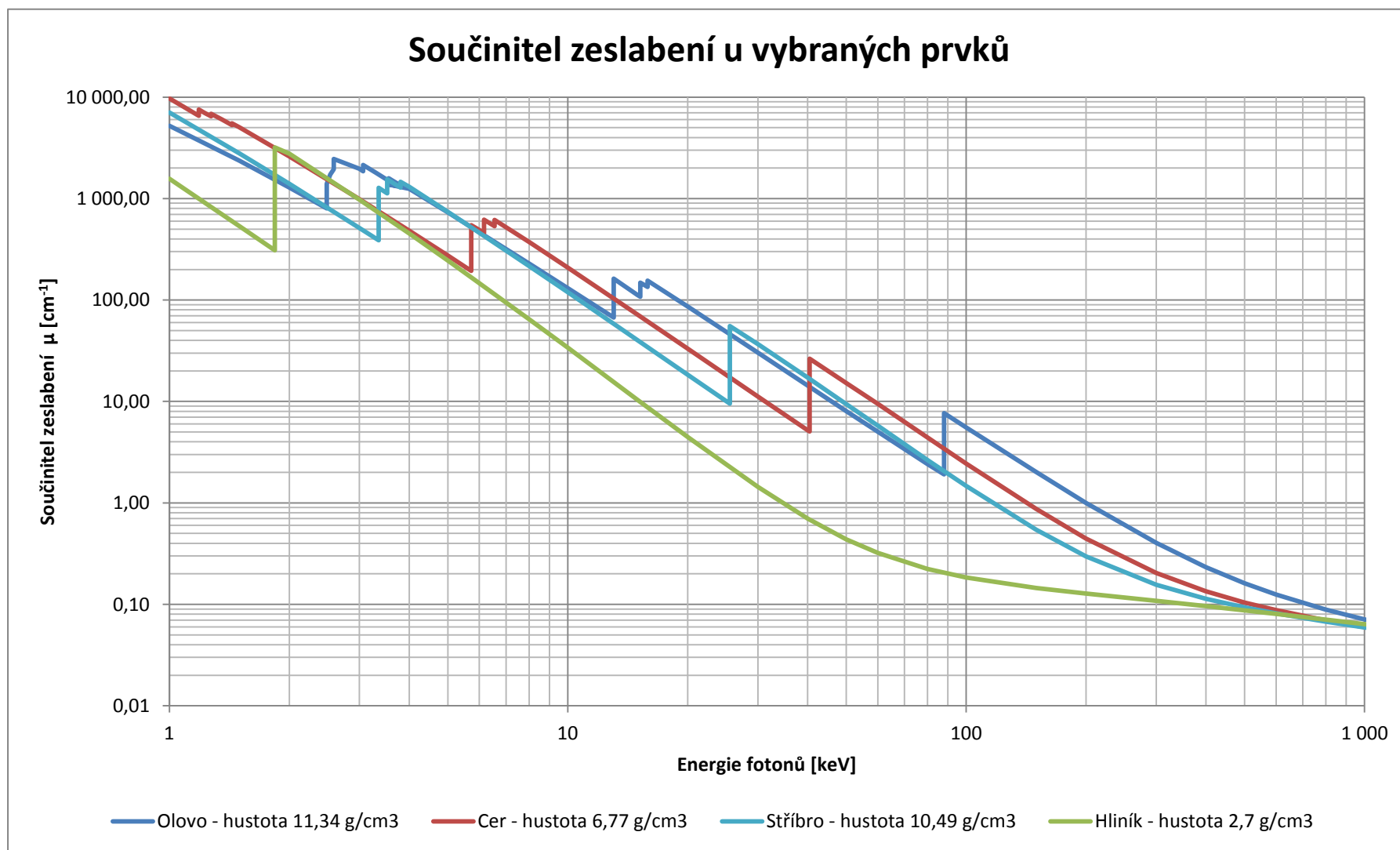
V rámci výzkumného projektu Ministerstva vnitra ČR s názvem „Výzkum možností aplikace nových materiálů (se zaměřením na nanomateriály) a progresivních technologií k ochraně osob proti působení CBRN látek s důrazem na kritickou infrastrukturu“, jsou ve spolupráci se Státním ústavem jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. vyvíjeny a následně zkoumány nové materiály, některé z nich určené k ochraně před zářením. V rámci uvedeného programu je na místě prověřit vyvinuté materiály z hlediska posouzení jejich vhodnosti jako stínícího materiálu užitých u prostředků ochrany před ozářením osob.

3.1 POPIS VZORKŮ KATEDRY NETKANÝCH TEXTILÍ

Pro odstínění ionizujícího záření se v současnosti používají prvky s atomovým číslem vyšším než 60, nejčastěji baryum, wolfram, molybden, olovo, bismut, europium, gadolinium. Účinnost bývá porovnávána s olovem, nejběžněji používaným ochranným materiálem.

Lineární součinitel zeslabení μ [m^{-1}] je konstanta popisující pokles proudu částic s tloušťkou absorbující vrstvy a je charakteristická pro každý materiál. Graf 1 znázorňuje součinitele zeslabení vybraných prvků - olova, ceru, stříbra a hliníku. Hustoty jednotlivých prvků se velmi liší, od hliníku o hustotě $2,7 \text{ g/cm}^3$ až po olovo s hustotou $11,34 \text{ g/cm}^3$. Je patrné, že prvky zeslabují při různých energiích odlišně, a např. u energie 10 keV je výhodnější jako stínící prvek nepoužít olovo, ale cer. Pro pokrytí celého spektra energie emitovaných fotonů je žádoucí využít co možná nejvíce prvků z periodické tabulky, samozřejmě s ohledem na jejich hustotu, atomové číslo, součinitel zeslabení, rozpustnost a toxicitu. Popis mechanismu zeslabení je uveden v kapitole 1.2.

Součinitel zeslabení u vybraných prvků



Graf 1: Součinitel zeslabení

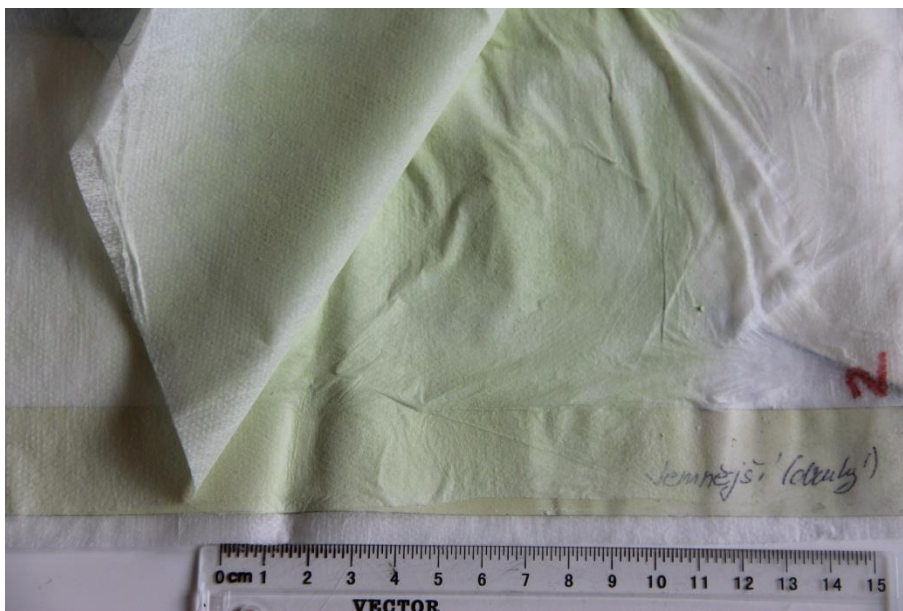
Graf 1 vychází z tabelovaných hodnot uvedených v publikaci T. E. JOHNSON [16].

V rámci výzkumu byly vyrobeny sloučeniny těžkých kovů ve formě soli kyseliny wolframové. Částice bylo nutné velikostně přizpůsobit, proto byly před integrací do nanovláken zpracovány technologií mechanického mletí [17]. Ve 40 ml čistého etanolu bylo rozmícháno 1,86 g nanočástic sloučenin těžkých kovů, ke kterému byla přidáno 3,72 g polyvinylbutaralu (PVB). Suspenze částic sloučenin wolframu byla zvlákňována za pomoci metod elektrostatického zvlákňování DC electrospinning, rychlost posuvu podkladu 0,05 m/s, použité napětí 50 kV při vzdálenosti kolektoru 140 mm. Částice se ve vláknech zapouzdřily a imobilizovaly, jejich rozložení je dostatečně rovnoměrné. Detailním prozkoumáním bylo zjištěno, že nedošlo k difuzi žádné složky práškových materiálů do vláken, ale že jsou pouze mechanicky zachyceny. Z důvodu silného sklonu částic agregovat docházelo ke kolabování proudu nanovláken [17].



Obrázek 16: Nanovláknenná vrstva fixovaná mezi vrstvami netkané textilie

Pro další testování materiálu bylo nutné vzniklý nanovláknenný produkt zafixovat mezi dvě vrstvy netkané textilie.



Obrázek 17: Nanovláknenná vrstva fixovaná na netkané textílii

Tabulka 9 představuje některé ze sloučenin, které byly pro účely ověření účinnosti testovány.

Tabulka 9: Příklad připravených sloučenin a jejich hustoty

Sloučenina	Hustota
PbWO_4 - Wolframan olovnatý	$8,34 \text{ g/cm}^3$
$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ - Wolframan bismutitý	$7,99 \text{ g/cm}^3$
$\text{Ce}_2(\text{WO}_4)_3$ - Wolframan ceritý	$6,2 \text{ g/cm}^3$
$\text{Pr}_2(\text{WO}_4)_3$ - Wolframan praseodymitý	7 g/cm^3
$\text{Zr}(\text{WO}_4)_2$ - Wolframan zirkoničitý	$5,09 \text{ g/cm}^3$
$\text{Hf}(\text{WO}_4)_2$ - Wolframan hafničitý	$8,5 \text{ g/cm}^3$

4. PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENT

4.1 FALCON 5000®

Falcon 5000® je přenosný High Purity Germanium (HPGe) detektor. Přesně a rychle identifikuje zdroj záření, určí jeho polohu a určí, které izotopy jsou přítomné. Je vysoce výkonný a je dodáván s plnou verzí gama analytického softwaru Canberra, Genie 2000. Jednoduché uživatelské rozhraní umožňuje snadnou navigaci v základních kontrolních funkcích, měření může být zastaveno, spuštěno a uloženo kdykoliv během experimentu. Dostupné uživatelské režimy jsou určení dávky, spektrometrický mód a jednoduchá identifikace radionuklidů. Všechny režimy jsou k dispozici přímo z hlavní obrazovky. Jakmile je Falcon 5000® nakonfigurován a uživatel jednoduše spustí měření, část výsledků je ihned prezentována. Hlavním cílem je, aby s detektorem mohl pracovat jak expert, tak i začátečník. I když je přístroj předem nakonfigurován a paměť obsahuje výchozí řadu radionuklidů, uživatel může snadno měnit obsah knihovny nebo vložit jiná data, podle toho, pro jakou aplikaci jsou data využívána. [20]

4.2 ZAŘIČE

Americium 241

Americium je radioaktivní kovový prvek, který vyzařuje alfa a gama záření. Tento radionuklid je připravován v jaderných reaktorech především z plutonia. Vzhledem k relativně krátkému poločasem rozpadu se tento v přírodě přirozeně nevyskytuje. Izotop ^{241}Am s poločasem rozpadu 432 let vzniká rozpadem ^{241}Pu . Využívá se v měřicích přístrojích jako zdroj záření, v hlásičích požáru a při léčbě nádorů. ^{241}Am vyzařuje γ záření s energií 60 keV [21]. Pro účely měření v rámci diplomové práce bylo ^{241}Am vybráno jako představitel emise nízkoenergetického gama záření.

Kobalt 60

Kobalt patří do skupiny těžkých kovů. ^{60}Co je nestabilní izotop s poločasem rozpadu 5,2 let a uvolňuje vysokoenergetické gama záření, připravuje se neutronovým ozařováním kovového kobaltu v jaderném reaktoru [21]. Využívá se hlavně v medicíně jako zdroj γ záření pro ozařování rakovinných nádorů, dále pro nedestruktivní odhalování vad výrobků

(tzv. defektoskopie), a kobaltová modř se používá na barvení skla a keramiky. Stopové množství kobaltu je pro organismus nezbytné, jeho nedostatek způsobuje anémii, nechutenství, únavu, hubnutí a zpomalení růstu. Je součástí vitamínu B12 [19]. Fotony gama záření mají energii 1,173 MeV a 1,332 MeV [21]. Pro účely měření v rámci diplomové práce byl ^{60}Co vybrán jako představitel vysokoenergetického gama záření.

Europium 152

Europium je kovový prvek s poločasem rozpadu 13,54 roků, isotop ^{152}Eu vzniká při ozařování europia pomalými neutrony v jaderném reaktoru. Pro účely měření v rámci diplomové práce byl tento izotop vybrán jako představitel široko energetického gama záření - 122 keV, 245 keV, 344 keV, 779 keV, 867 keV, 964 keV, 1086 keV, 1112 keV a 1408 keV. Pro tento velký energetický rozsah je ^{152}Eu používáno jako kalibrační etalon v gama-spektrometrii.

MĚŘICÍ SOUSTAVA

Během celého experimentu je třeba zachovat geometrii - přístroj, detektor i stínící vrstvy musí být rozmístěny v neměnné vzdálenosti. Soustava se skládá z bodového zářiče, kolimátoru zářiče (k usměrnění toku fotonů), hrazdy na umístění testovaného vzorku, kolimátoru detektoru a detektoru (resp. přístroje Falcon 5000). Kolimátory mj. potlačují vliv rozptýleného záření na zkreslení hlavních zkoumaných píků spekter v zájmové energetické oblasti.



Obrázek 18: Měřicí soustava

5. PRACOVNÍ POSTUP

5.1 STANOVENÍ POZADÍ

Pro metodicky správné porovnání výsledků měření je třeba nejdříve určit pozadí. Hlavní součástí přírodního pozadí je ionizující záření z vesmíru i naší Země. Úroveň tohoto přírodního pozadí závisí na konkrétních místních podmínkách, během času se příliš nemění.

Čas měření pozadí byl, vzhledem k předpokládané malé četnosti impulsů, zvolen delší. V rámci diplomové práce je zkoumáno rozmezí energií od 10 keV do 200 keV, odpovídající rentgenovému a nízkoenergetickému gama záření. Pro další zpracování byl proto zredukován počet kanálů na 560. Každé měření bylo provedeno minimálně pětkrát. Byla stanovena průměrná odezva za daný čas, variační koeficient a intervaly spolehlivosti dle vztahů:

Průměr

$$E(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) \quad (8)$$

Směrodatná odchylka

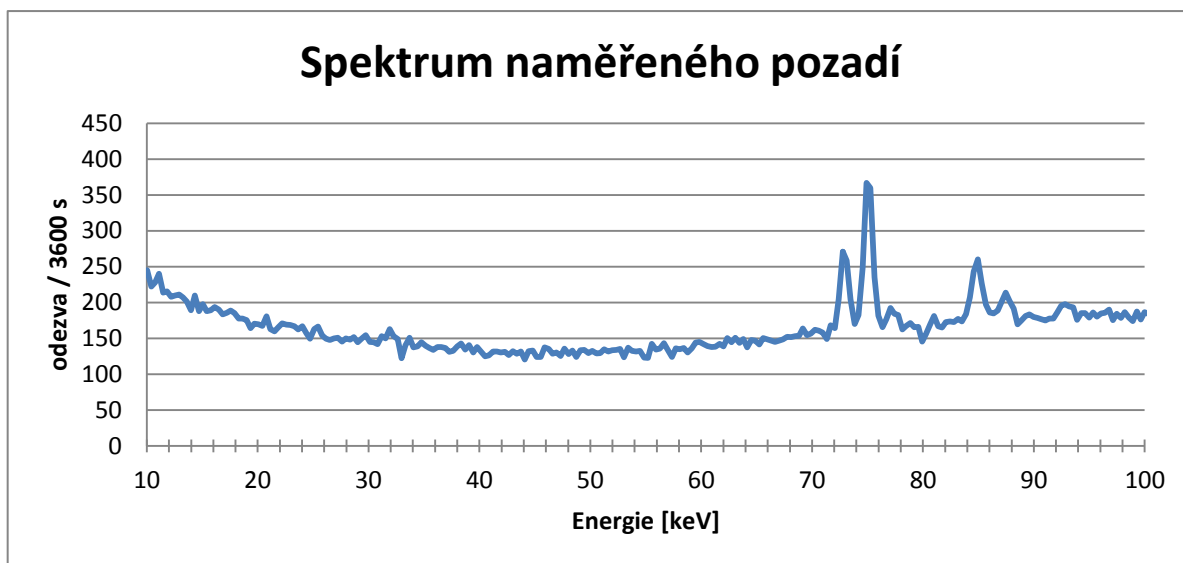
$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2} \quad (9)$$

Variační koeficient

$$V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} = \frac{\sigma}{E(X)} \quad (10)$$

Intervaly spolehlivosti s pravděpodobností 68 %

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2} = E(X) \pm \sigma \quad (11)$$



Graf 2: Spektrum naměřeného pozadí v zájmové energetické oblasti

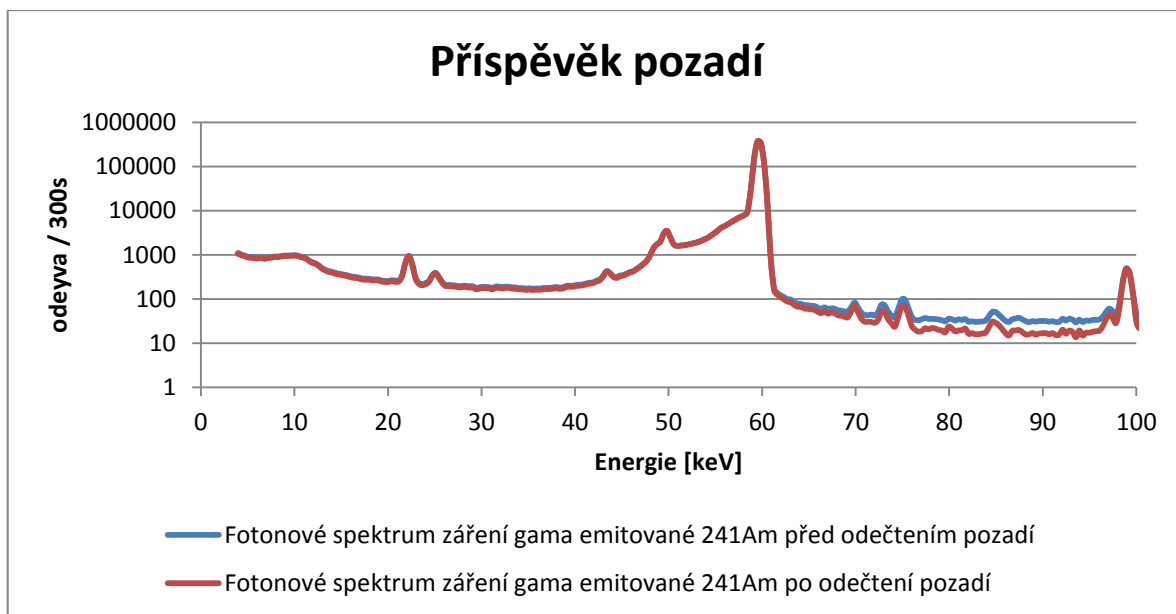
Graf 2 zobrazuje průměrné spektrum při absenci zářiče. Osa x odpovídá energii, s jakou dopadly fotony na plochu detektoru. Počet fotonů interagujících v dané energetické třídě za daný čas je vyneseno na ose y. Výrazně zvýšené množství fotonů označujeme jako pík.

5.2 STANOVENÍ SPEKTRA AMERICIA 241

Měření bylo provedeno patnáctkrát, a to po dobu 300 s. Při zpracování dat byl zvolen stejný postup jako při měření pozadí: data roztríděna do intervalů, stanovena hranice a délka intervalu. Opět se zredukovalo měření na 560 kanálů, byla stanovena směrodatná odchylka, průměrná odezva za daný čas.

Graf 3 zobrazuje spektrum při použití americia 241 před a po odečtení pozadí. Pro zjištění počtu fotonů ^{241}Am dopadajících na detektor je třeba odečíst hodnoty pozadí. Toto bylo provedeno a výsledek je zobrazen ve stejném grafu červenou barvou. Spektrum bude

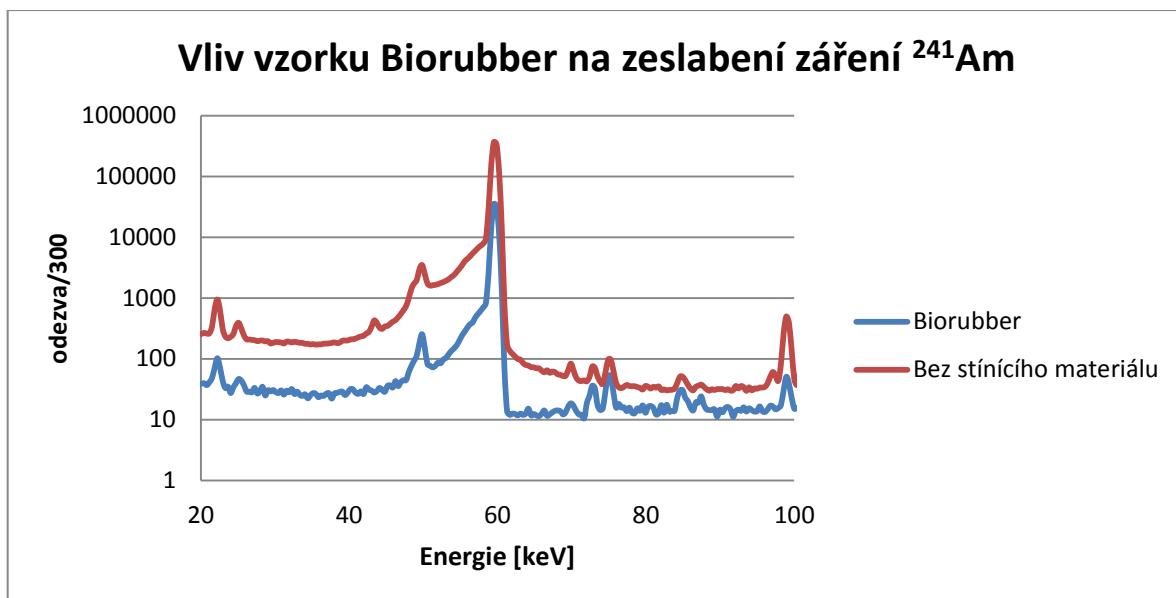
použito pro stanovení účinnosti testovaných vzorků. Budou porovnávány hodnoty z Graf 3 bez použití stínících vrstev a při použití stínících vrstev.



Graf 3: Příspěvek pozadí

5.3 MĚŘENÍ VZORKU BIORUBBER

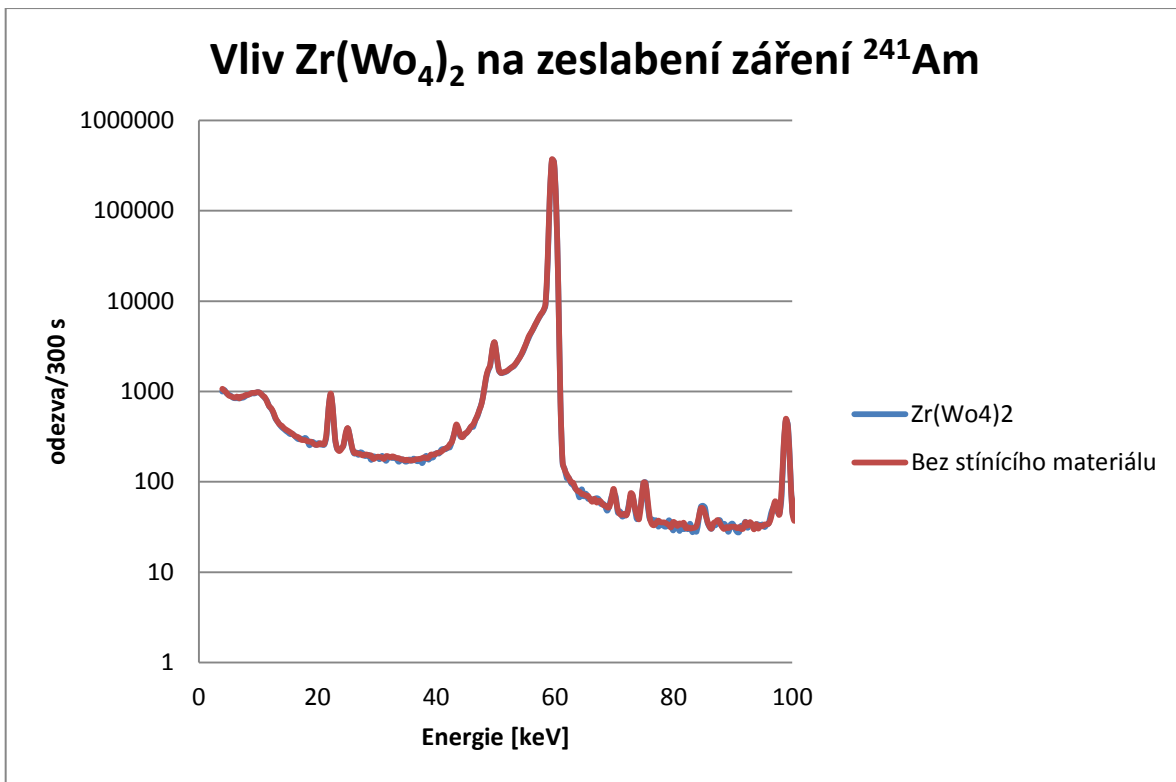
Mezi zářič a měřicí přístroj byl vložen vzorek materiálu Biorubber, jehož součástí jsou mimo jiné i speciálně upravená uhlíková vlákna a slitiny těžkých kovů (především olova), které mají chránit před účinky beta a gama záření. Graf 4 potvrzuje stínící schopnost tohoto vzorku. Množství částic dopadajících na plochu detektoru je viditelně nižší. Pokud by u testovaných vzorků bylo dosaženo takového snížení, bylo by možné je považovat za účinné.



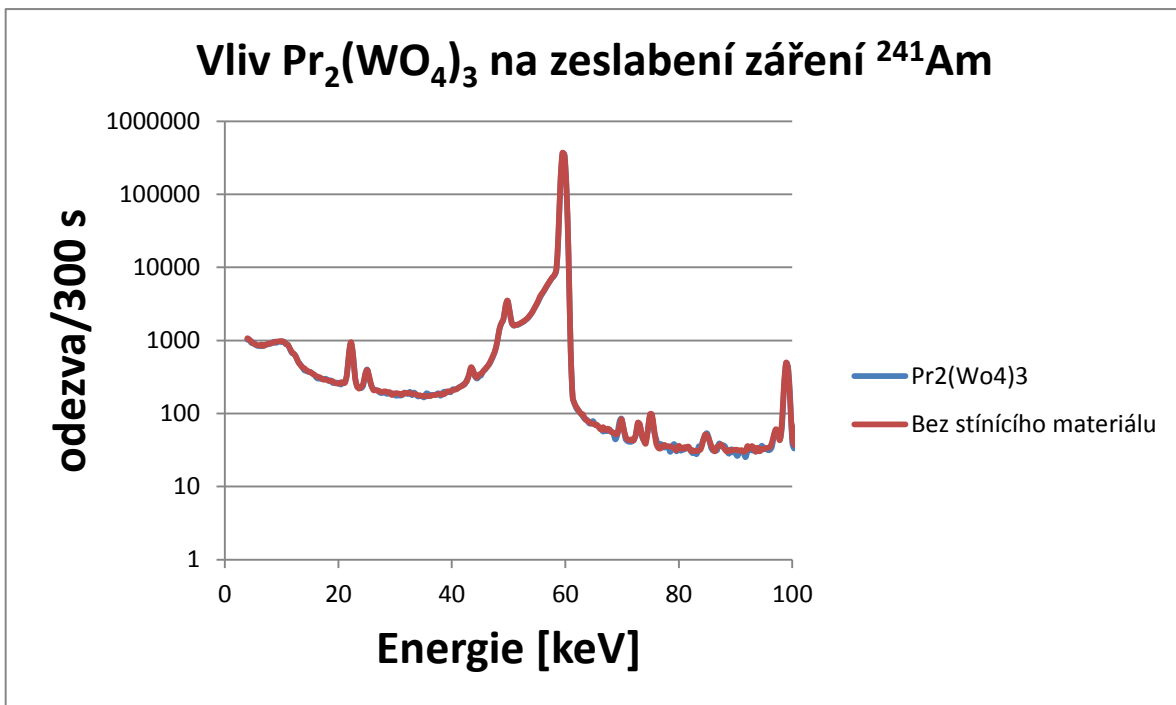
Graf 4: Spektrum při užití materiálu Biorubber (aplikace ^{241}Am)

5.4 MĚŘENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ TUL

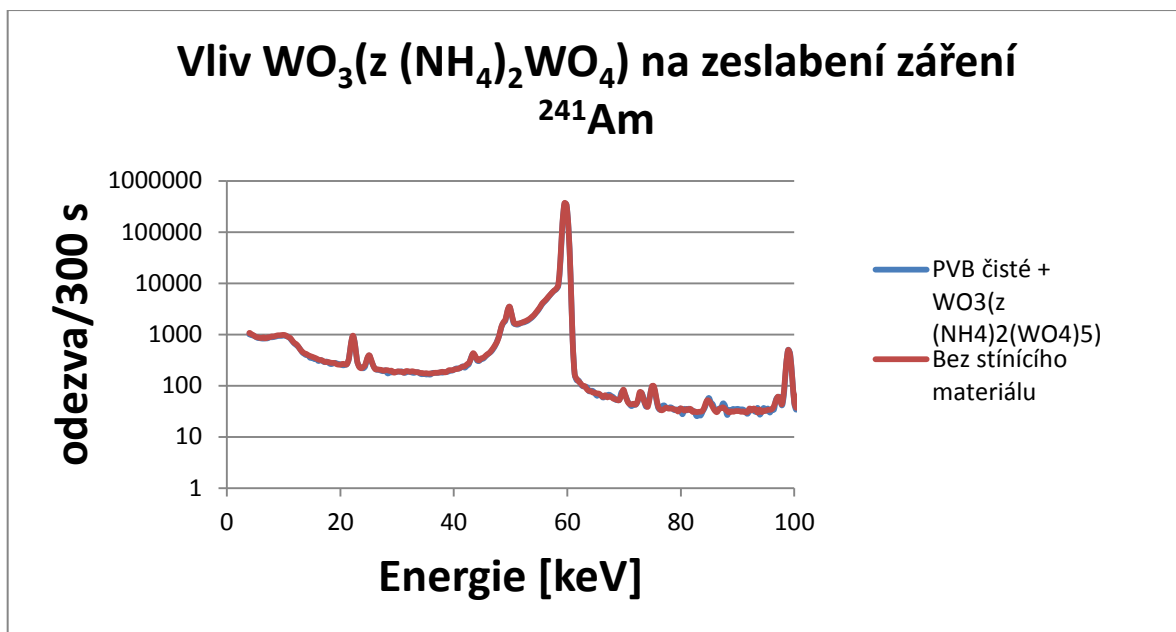
Níže uvedené grafy reprezentují výsledky zeslabení penetrace nízkoenergetického záření materiály blíže popsány v kapitole 3.1. Červená křivka reprezentuje tok fotonů Am^{241} přímo ze zdroje do detektoru, modrá křivka reprezentuje vliv uvedeného materiálu vloženého mezi detektor a zdroj.



Graf 5: Vliv $Zr(WO_4)_2$ na zeslabení záření ^{241}Am

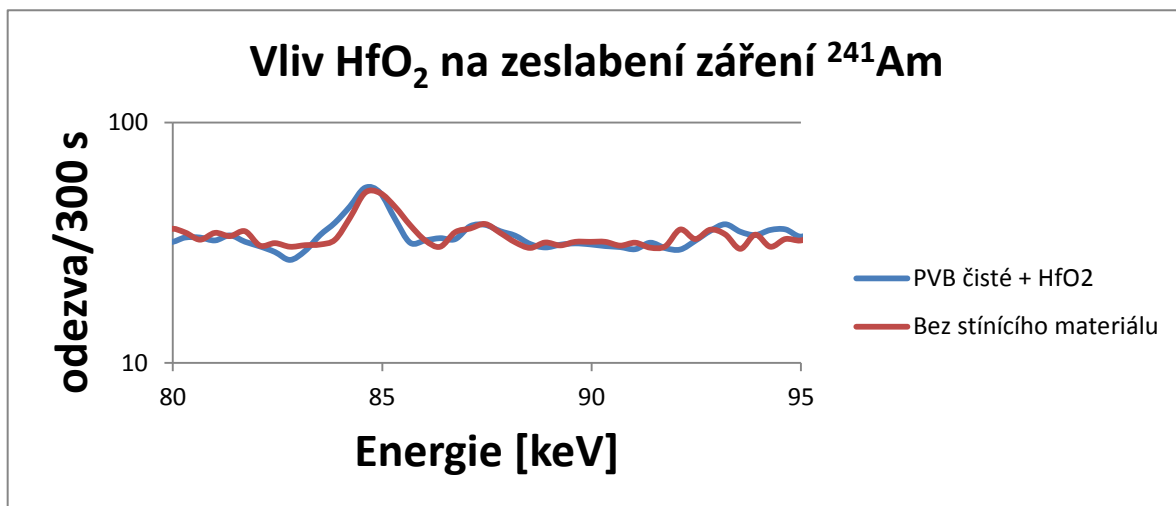


Graf 6: Vliv $Pr_2(WO_4)_3$ na zeslabení záření ^{241}Am



Graf 7: Vliv $\text{WO}_3(\text{z}(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4)_5$ na zeslabení záření ^{241}Am

U vzorku PVB čisté + HfO_2 je zobrazen detail grafu, a to rozmezí 80 - 95 keV.



Graf 8: Vliv HfO_2 na zeslabení záření ^{241}Am

V energetické třídě 1 - 100 keV není možné prokazatelně potvrdit stínící schopnosti testovaných vzorků. Dalším postupem proto je zpracovat naměřená data matematicky. Pro potřeby srovnání tlumících vlastností jednotlivých testovaných vzorků byl zaveden tzv. faktor zeslabení F_Z :

$$Fz = \left(1 - \frac{\sum_{N_E}(\text{vzorek})}{\sum_{N_E}({}^{241}\text{Am})}\right)100 \quad (12)$$

kde:

$\sum_{N_E}(\text{vzorek})$ - součet impulsů daných fotony po průchodu testovaným materiálem v energetické oblasti E

$\sum_{N_E}(\text{Am241})$ - součet impulsů v energetické oblasti E bez přítomnosti testovaného materiálu

Faktor zeslabení vyjadřuje procentuální zeslabení záření v dané energetické oblasti.

Tabulka 10: Faktor zeslabení testovaných vzorků v energetické oblasti 1 - 100 keV

Materiál	Americium	Am + vzorek	Fz [%]
Biorubber	1 171 723	112 011	90,44
Zr(WO ₄) ₂	1 171 723	1 165 002	0,57
Pr ₂ (WO ₄) ₃	1 171 723	1 164 431	0,62
PVB + WO ₃ (z (NH ₄) ₂ WO ₄) ₅	1 171 723	1 152 450	1,64
PVB + HfO ₂	1 171 723	1 166 286	0,46
PVB + Ce roztok	1 171 723	1 168 556	0,27

Tabulka 11 zužuje rozsah kontrolovaných energií, a to na 50 - 100 keV.

Tabulka 11: Faktor zeslabení testovaných vzorků v energetické oblasti 50 - 100 keV

Platí pro 50 - 100 keV			
Materiál	Americium	Am + vzorek	Fz [%]
Biorubber	1 110 332	105 189	90,53
Zr(WO ₄) ₂	1 110 332	1 102 649	0,69
Pr ₂ (WO ₄) ₃	1 110 332	1 099 384	0,99
PVB + WO ₃ (z (NH ₄) ₂ WO ₄)	1 110 332	1 090 764	1,76
PVB + HfO ₂	1 110 332	1 102 239	0,73
PVB + Ce roztok	1 110 332	1 105 783	0,41

Z Tabulka 11 je patrné, že materiál Biorubber je schopen odstínit 90 % záření dopadajícího na plochu vzorku a detektoru, a to v celé energetické oblasti 1 - 100 keV. Z ostatních testovaných materiálů dosahuje faktor zeslabení 2% u vzorku oxidu wolframového WO₃, a to v celé oblasti 1 - 100 keV.

Závěry vyplývající z experimentálního měření

Bylo proměřeno několik vzorků poskytnutých Katedrou netkaných textilií FT TUL. Pro testování bylo užito zdroje záření Americia 241. Spektra gama záření získaná po průchodu materiálem byla srovnána se spektrem ²⁴¹Am bez testovaného vzorku. Z jednotlivých vzorků ani jeden nevykazuje tak výrazné utlumení dopadu záření jako u Biorubberu. Z vizuálního porovnání spekter nebylo možné stínící vlastnosti prokazatelně potvrdit. Reálná hodnota faktoru zeslabení byla proto získána za pomoci vzorce (12).

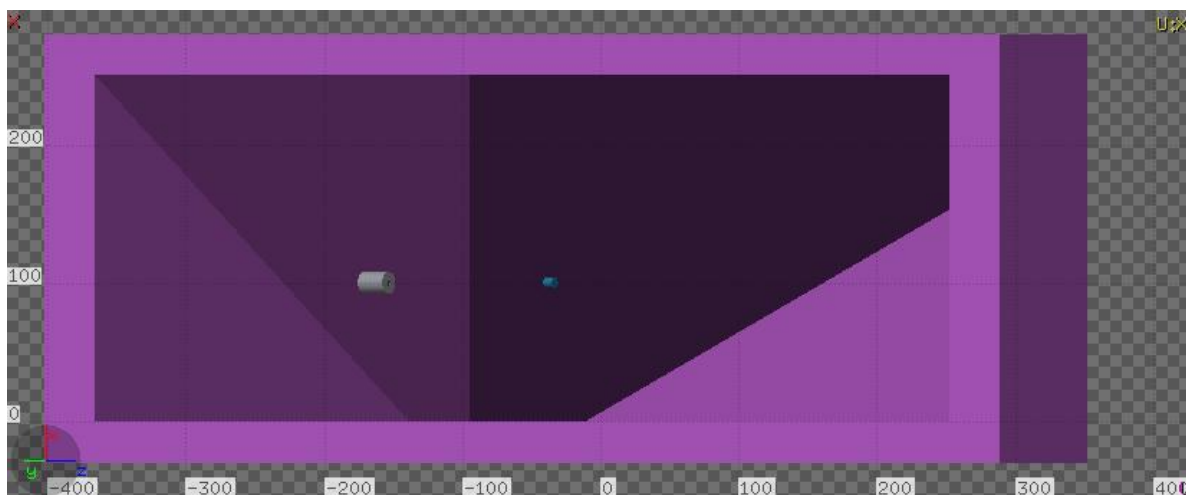
6. SIMULACE INTERAKCE PRVKŮ S HMOTOU

Vývoj stínících materiálů na Katedře netkaných textilií je momentálně ve fázi kombinování jednotlivých prvků do sloučenin a jejich následné testování. Základním stavebním kamenem všech vzorků je wolfram, ke kterému jsou přidávány další prvky. Výsledná sloučenina by měla poskytovat stejné stínící schopnosti jako olovo, avšak za lepších uživatelských vlastností (hmotnost výsledného obleku a jeho údržba).

FLUKA je nástroj pro výpočet transportu částic a simulaci jejich interakce s látkou. Jedná se o software volně přístupný na stránkách výrobce, pro studijní účely je po zaregistrování se zdarma. FLUKA je vytvořena pro prostředí operačního systému Linux, v tomto případě je použita distribuce Fedora. Vzhledem k náročnosti výpočtů je výhodné simulaci spouštět na výkonném PC, případně snížit množství informací ke zpracování, zjednodušit simulované podmínky. Pro většinu aplikací není od uživatele potřebné žádné programování, nicméně pro uživatele se zvláštními požadavky je k dispozici řada vylepšení (ve Fortran 77). Základní prostředí programu je velmi podobné standardním programům balíčků Microsoft Office, jedná se o záložky, ze kterých uživatel vybírá již naprogramované příkazy [18].

FLUKA může s vysokou přesností simulovat interakce a šíření asi 60 různých částic, včetně fotonů a elektronů od 1 keV do tisíců TeV.

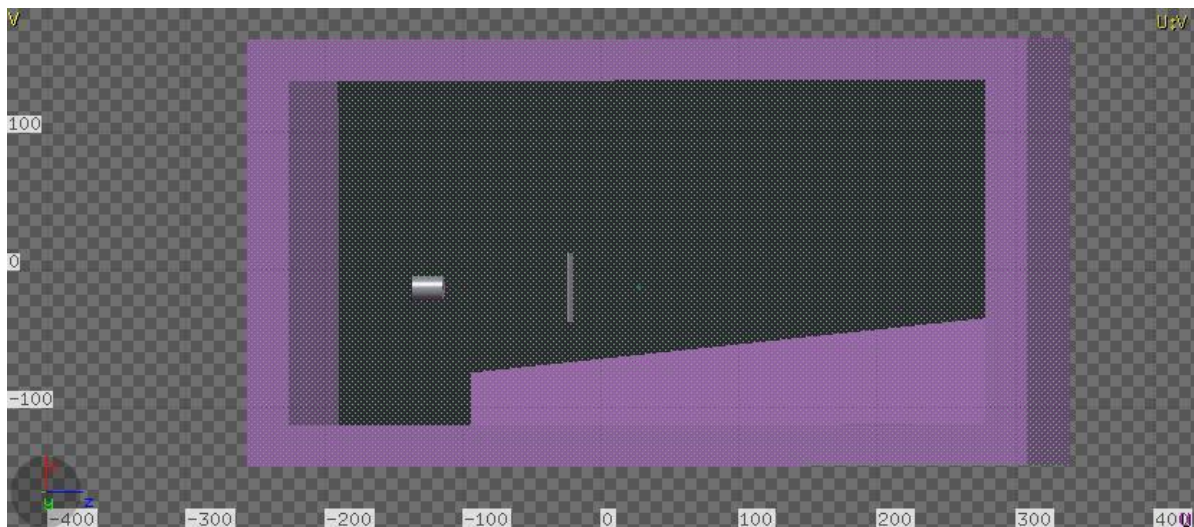
Prvním krokem k provedení požadované simulace je vytvoření virtuální místnosti, ve které bude měření probíhat.



Obrázek 19: Simulovaný prostor

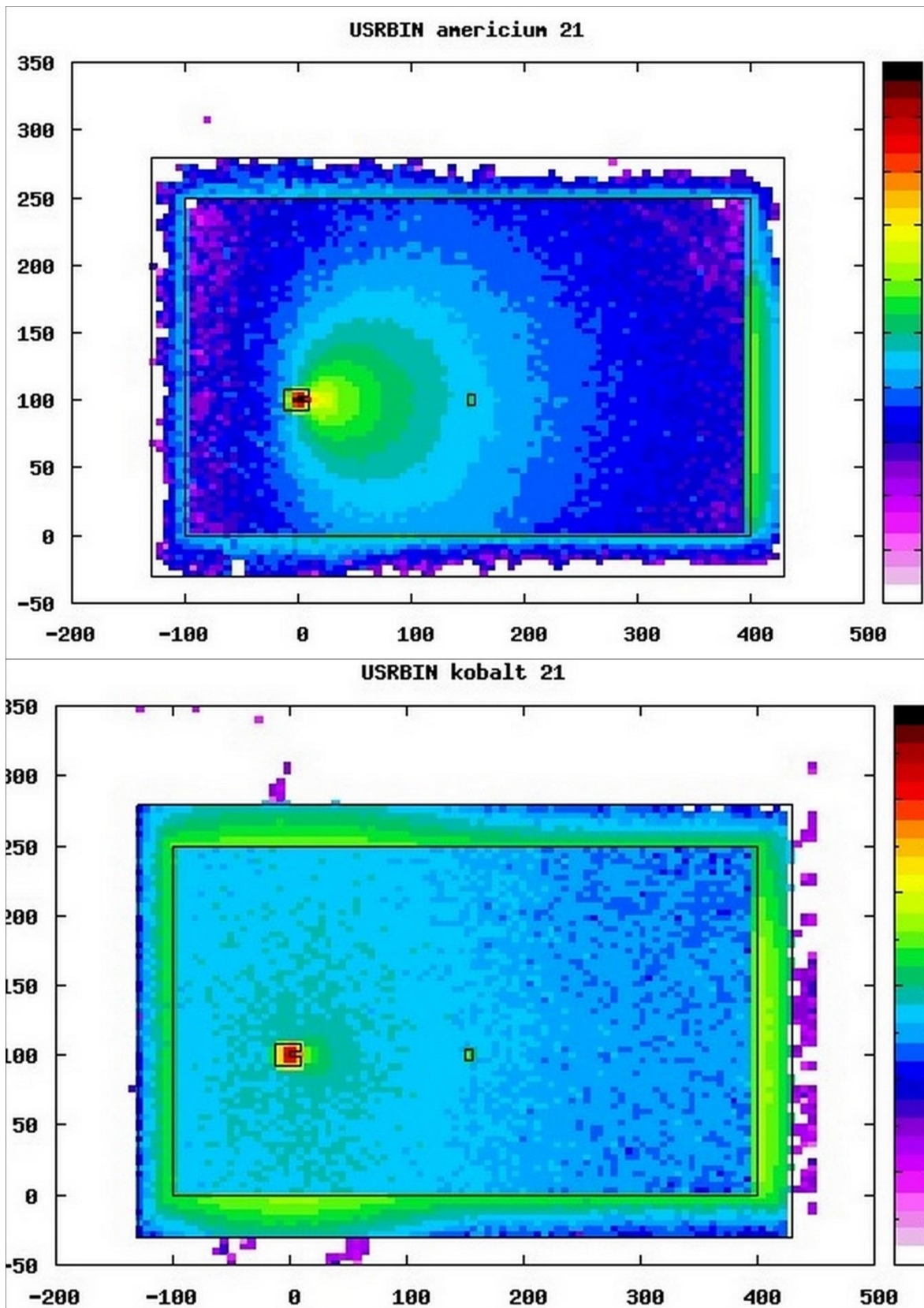
Jedná se o místnost o rozměrech 5 x 5 m, výška 2,5 m. Místnost je vyplněna vzduchem, stěny jsou z betonu. V definovaném bodě místnosti je umístěn bodový zdroj záření (Americium 241). Tento zdroj je v olověném stínění, což je dutý válec o délce 22 cm a průměru 8 cm. Přímo proti zdroji záření je ve vzdálenosti 1,5 m umístěn detektor z jodidu sodného NaI.

Nejdůležitější je správně nastavit chemické složení jednotlivých testovaných vzorků. Z knihovny FLUKY je možné vybrat celou řadu prvků a sloučenin, u kterých jsou již přednastavené základní fyzikální charakteristiky. Poměr jednotlivých složek v testovacím vzorku je vyjádřený procentuálním zastoupením. Velikost všech vzorků je nastavena na 50 cm x 50 cm. Obrázek 19 představuje místnost s bodovým zdrojem záření a detektorem, bez stínění. Schéma Obrázek 20 bylo použito k vytvoření simulace s testovaným vzorkem, pro různé materiály bylo nutné změnit jejich chemické složení.



Obrázek 20: Simulovaný prostor s testovaným vzorkem

Výsledkem simulace je mimo jiné také grafické zobrazení počtu dopadajících částic, viz Obrázek 21. Americium se řadí mezi nízkoenergetické zdroje záření, kobalt patří k vysokoenergetickým. Se zvyšujícím se počtem interagujících částic se mění barva spektra od bílé přes modrou až k černé. Černě je zobrazený zdroj záření. Je zřetelné, že počet dopadajících fotonů z ^{241}Am na detektor je menší než v případě užití ^{60}Co . Obrázek 21 popisuje simulaci interakci bodového zdroje záření a detektoru bez použití jakéhokoliv stínícího materiálu. Hlavním výstupem simulace je matematické vyjádření míry útlumu.



Obrázek 21: Grafický výstup z programu FLUKA

6.1 SIMULACE OLOVO

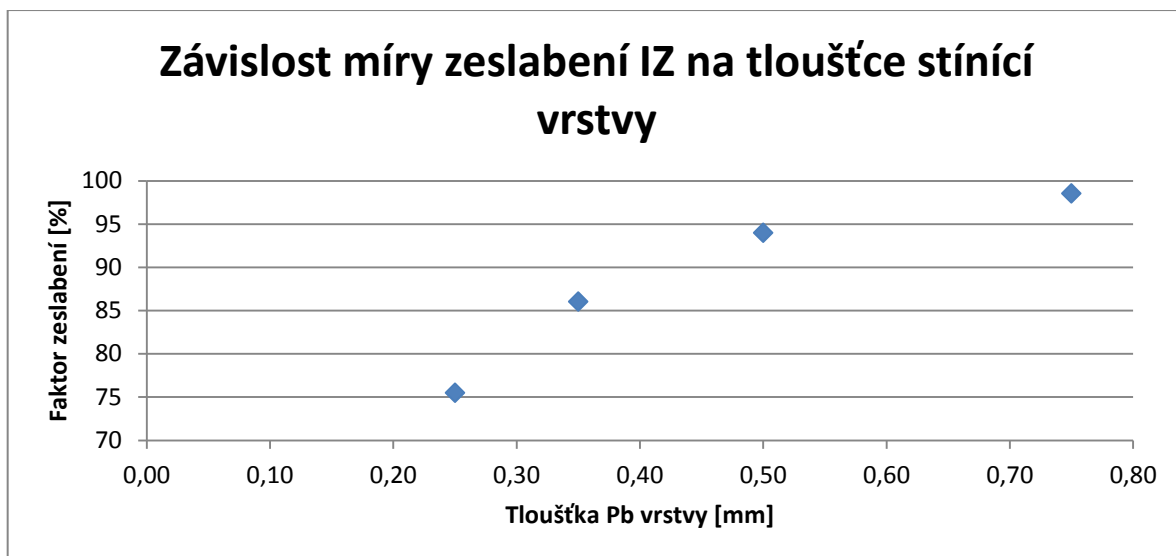
Jako první byl proveden testovací pokus se stínicí vrstvou z olova o tloušťce 0,5 mm. Olovo je považováno za nejvhodnější prvek k odstínění ionizujícího záření. Schopnost stínění jakéhokoliv nově vyvíjeného materiálu pro ochranu před účinky IZ je porovnávána právě k olovu. Norma ČSN EN 61331-3 (364731) Ochranné prostředky před lékařským diagnostickým rentgenovým zářením - Část 3: Ochranné oděvy a ochranné prostředky pro gonády pojednává o všeobecných požadavcích na průvodní dokumentaci a požadavcích na konstrukci a používaný materiál, o normalizovaných velikostech, zvláštních konstrukčních vlastnostech, minimálních zeslabovacích vlastnostech materiálů, značení a normalizovaných prohlášení shody s touto normou rozděluje ochranné zástěry do 4 kategorií [23]:

- Lehké ochranné zástěry - ekvivalent zeslabení nesmí být na celé ploše menší než 0,25 mm olova
- Těžké ochranné zástěry - ekvivalent zeslabení nesmí být v přední části menší než 0,35 mm olova a menší než 0,25 mm Pb v ostatních částech
- Lehké uzavřené ochranné zástěry - ekvivalent zeslabení nesmí být na celé ploše menší než 0,25 mm Pb
- Těžké uzavřené ochranné zástěry - ekvivalent zeslabení nesmí být v přední části menší než 0,35 mm Pb a menší než 0,25 mm Pb v ostatních částech

Tabulka 12 shrnuje výsledky simulací stínících schopností různých tlouštěk olověných desek. Dle vzorce (12) byl vypočten faktor zeslabení. Z Graf 9 je patrné, že se zvyšující se tloušťkou olova se zvyšuje faktor zeslabení.

Tabulka 12: Vliv tloušťky Pb na míru zeslabení, energie 60 keV

Tloušťka olova [mm]	Faktor zeslabení [%]
0	
0,25	75,49
0,35	86,01
0,50	93,97
0,75	98,51



Graf 9: Stínící schopnost olova při 60 keV

Dále byla provedena simulace stínících schopností 0,5 mm olova při různých energiích.

Tabulka 13: Stínící schopnost 0,5 mm Pb při různých energiích

Energie	Faktor zeslabení [%]
60 keV	93,97
150 keV	67,66
200 keV	42,77
400 keV	11,94
660 keV	5,88
1100 keV	3,51

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že pro zeslabení účinku vysokoenergetických fotonů (kobalt 60, 1100 keV) je třeba větší tloušťky než 0,5 mm.

6.2 SIMULACE BIORUBBER

Dalším pokusem je simulace odstínění záření za pomoci materiálu Biorubber. V programu FLUKA bylo definováno složení vzorku, získané z elektronické mikroskopie. Výsledky simulace byly porovnány s výsledky naměřenými v kapitole 5.3, zabývající se reálným měřením.

Tabulka 14: Koefficient zeslabení pro Biorubber

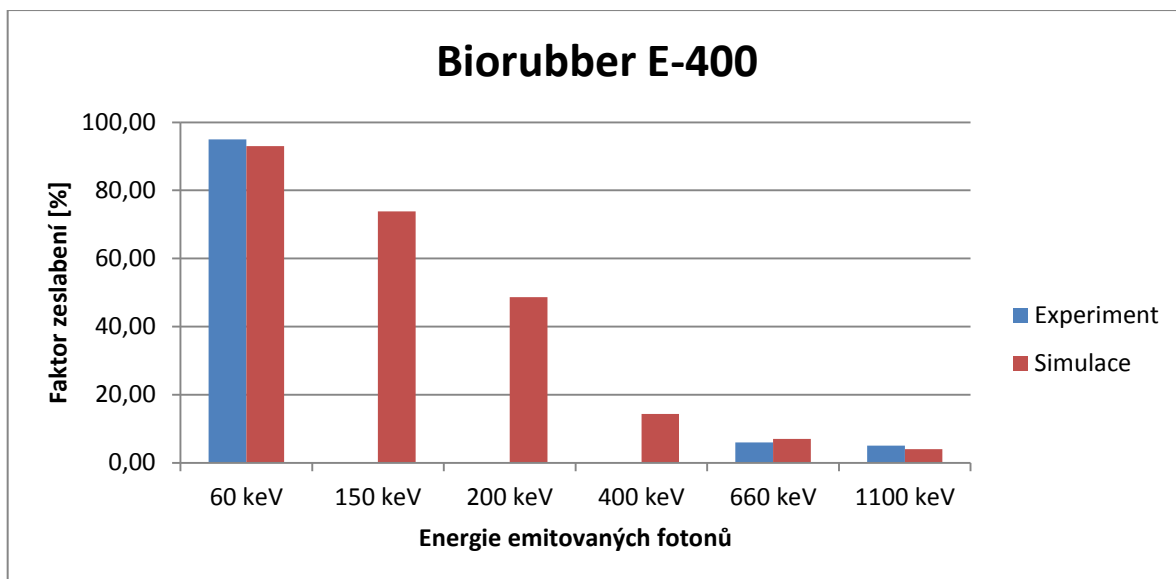
Energie	Faktor zeslabení [%]
60 keV	93,13
150 keV	73,88
200 keV	48,61
400 keV	14,36
660 keV	7,16
1100 keV	4,34

Zvolené energie odpovídají radionuklidům Am 241 (60 keV), Cesium 137 (660 keV) a Kobalt 60 (1100 keV). Pro každou energii byla provedena simulace bez stínící vrstvy a se stínící vrstvou o tloušťce 0,425 cm. Výsledné koeficienty zeslabení byly porovnány s výsledky naměřenými experimentálně a v potaz byly vzaty také výsledky prezentované v odborném článku Attenuation of X and Gamma Rays in Personal Radiation Shielding Protective Clothing [22].

Z výsledků v Tabulka 15 a Graf 10 je patrné, že vstupní data jsou adekvátně v programu Fluka volena - měření i simulace ukazují stejnou tlumící schopnost daného materiálu.

Tabulka 15: Porovnání změřených a předpokládaných výsledků - Biorubber

	Experiment	Simulace
	Faktor zeslabení [%]	
60 keV	95,00	93,00
150 keV	-	73,88
200 keV	-	48,61
400 keV	-	14,36
660 keV	6,00	7,00
1100 keV	5,00	4,00



Graf 10: Faktor zeslabení - experiment, simulace

6.3 SIMULACE VZORKŮ TUL

Dalším pokusem je simulace stínících schopností materiálů vyvíjených na Katedře netkaných textilií.

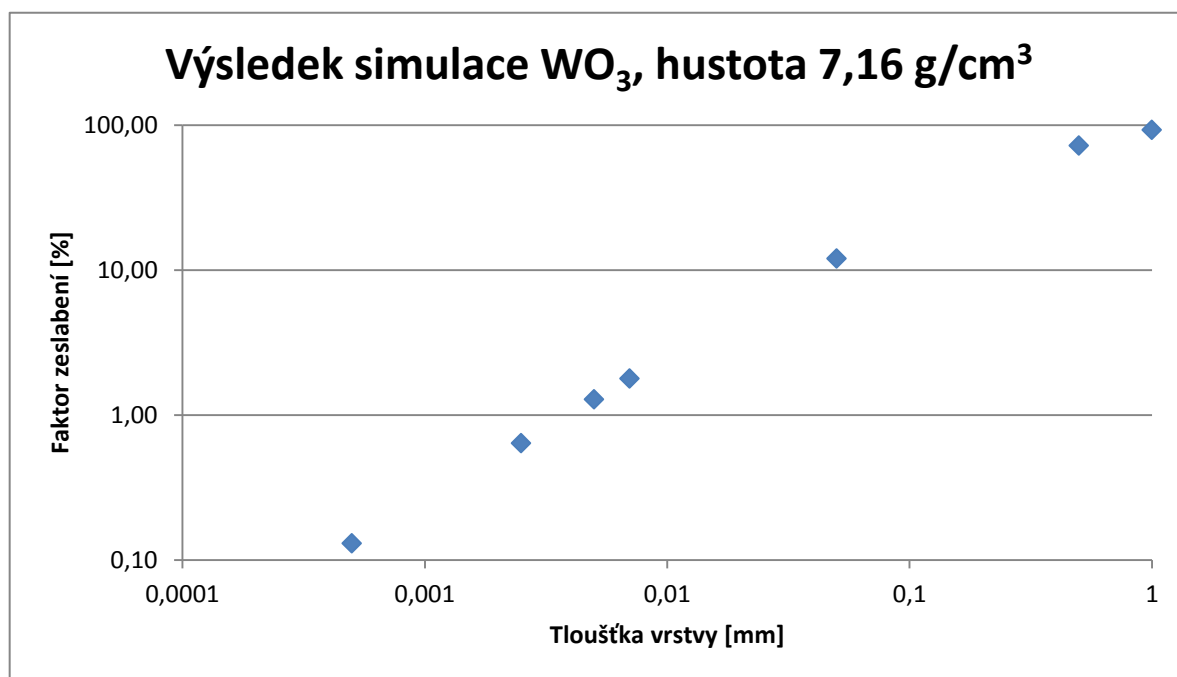
WO₃ - oxid wolframový

Pro své tlumící schopnosti byl dle Tabulka 10 pro simulaci vybrán vzorek nazvaný WO₃ (z (NH₄)₂WO₄)₅. Ve vrstvě, jaká byla k testování poskytnuta, dokázala odstínit necelá 2% záření o energii 60 keV. Tabulka 16 představuje výsledek simulace utlumení záření při různých tloušťkách vrstvy WO₃ při energii 60 keV (odpovídající Am 241). Se vzrůstající tloušťkou, jak je z principu stínění zřejmé, klesá procento dopadajících fotonů na detektor. Hustota WO₃ 7,16 g/cm³ je téměř poloviční než hustota olova, tudíž by tato sloučenina mohla být pro danou energetickou oblast z hlediska komfortu nošení oděvů, resp. hmotnosti obleku, výhodnější.

Tabulka 16: Výsledek simulace WO_3 , hustota $7,16 \text{ g/cm}^3$

Tloušťka vrstvy [mm]	Faktor zeslabení [%] při 60 keV
0,0005	0,13
0,0025	0,64
0,005	1,28
0,007	1,78
0,05	11,95
0,5	72,02
1	92,15

Tabelované hodnoty byly převedeny do grafické podoby, viz Graf 11.



Graf 11: Výsledek simulace WO_3

Z výsledků simulace vyplývá, že stínící schopnosti vzorku poskytnutý Technickou univerzitou v Liberci odpovídá zhruba tloušťce 0,007 mm.

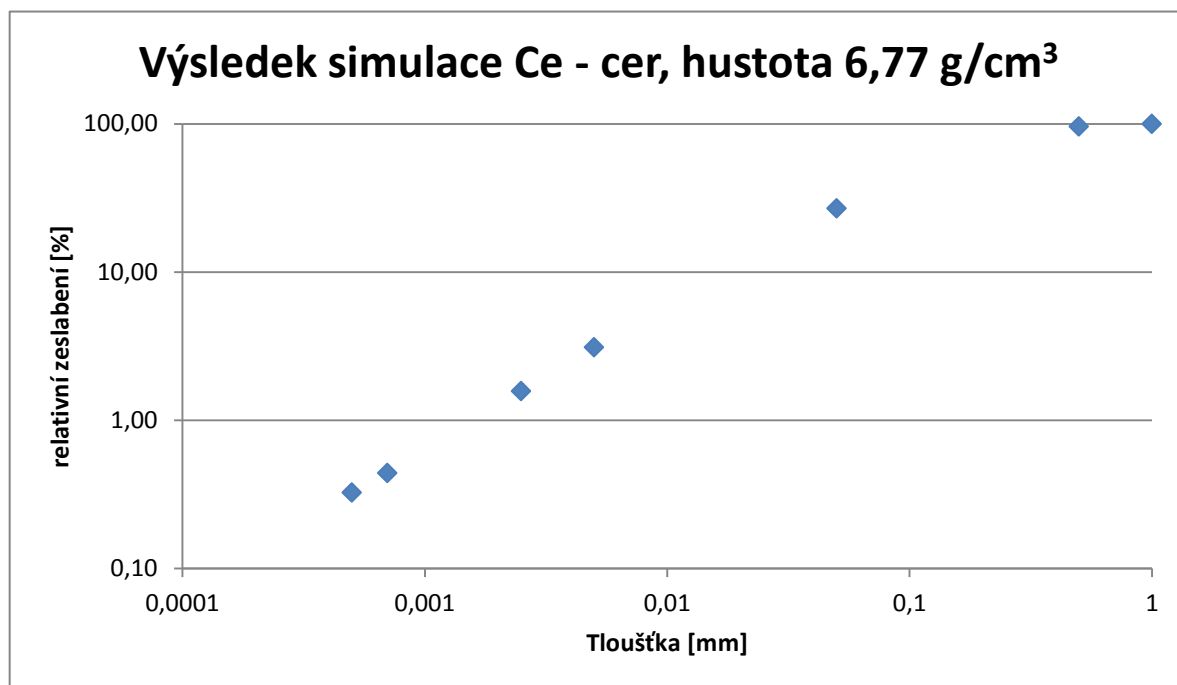
Ce - Cer

Dalším ze vzorků, u kterého byla provedena simulace interakce záření s hmotou, je vzorek s účinnou vrstvou z ceru. Tabulka 17 shrnuje výsledky simulace, a to v tloušťce až do 1 mm, při energii 60 keV. Hustota ceru je $6,77 \text{ g/cm}^3$, opět téměř poloviční než hustota olova.

Tabulka 17: Výsledek simulace Ce, hustota $6,77 \text{ g/cm}^3$

Tloušťka vrstvy [mm]	Faktor zeslabení [%] při 60 keV
0,0005	0,32
0,0007	0,44
0,0025	1,57
0,005	3,09
0,05	26,87
0,5	95,63
1	99,81

Tabelované hodnoty byly opět převedeny do grafické podoby, viz Graf 12.



Graf 12: Výsledek simulace Ce

Z výsledků simulace vyplývá, že stínící schopnosti vzorku poskytnutý Technickou univerzitou v Liberci odpovídá zhruba tloušťce 0,007 mm.

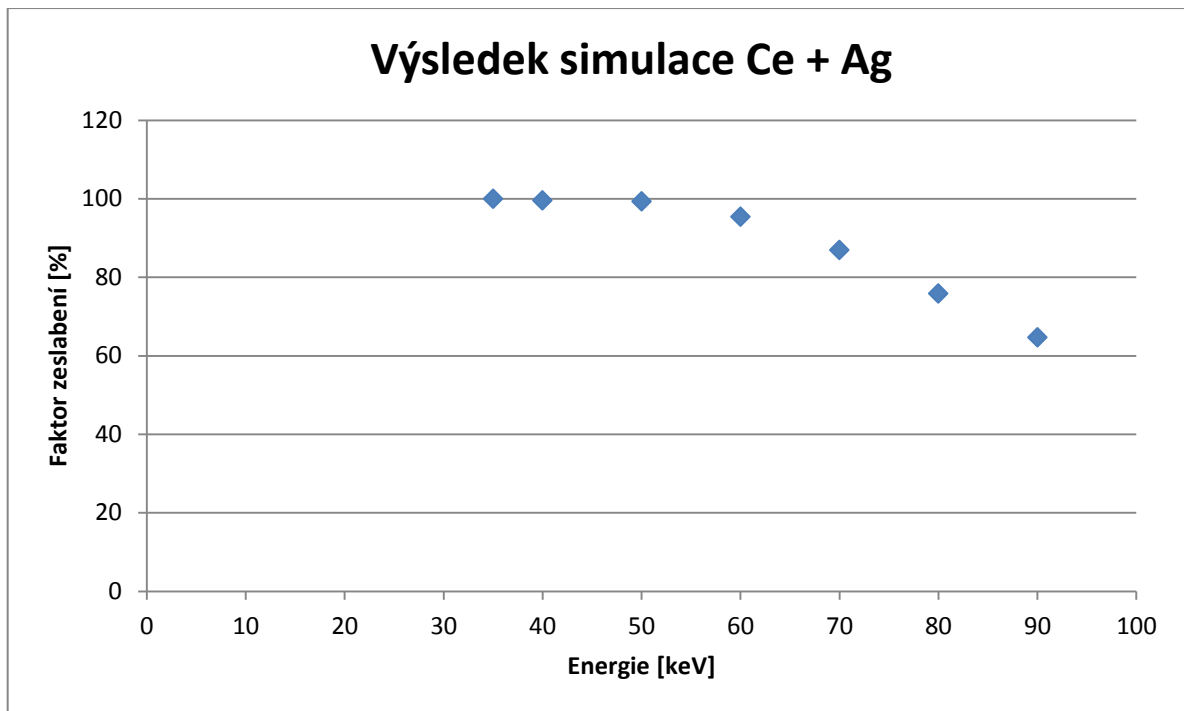
Ce + Ag - směs ceru a stříbra

Pro směs ceru a stříbra v poměru 1:1 byla simulována interakce fotonů s hmotou při různých energiích, při tloušťce stínící vrstvy 0,5 mm. Se vzrůstající energií je patrný nižší faktor zeslabení.

Tabulka 18: Faktor zeslabení Ce + Ag při různých energiích, tloušťka vrstvy 0,5 mm

Energie [keV]	Faktor zeslabení [%]
35 keV	99,95
40 keV	99,53
50 keV	99,34
60 keV	95,40
70 keV	86,89
80 keV	75,86
90 keV	64,63

Stříbro o hustotě $10,49 \text{ g/cm}^3$ má dle Graf 1 podobné, případně nižší zeslabující vlastnosti než olovo. Jelikož i hustota obou prvků je podobná, není, vzhledem k jeho ceně, stříbro nejvhodnějším prvkem pro reálné použití.



Graf 13: Výsledek simulace Ce + Ag

Z Graf 13 je patrné, že v oblasti do 40 keV má výrazný vliv na utlumení použití stříbra (viz Graf 1). Nad 40 keV kompenzuje snížení útlumového koeficientu stříbra užití ceru. S využitím více prvků a znalosti jejich útlumových koeficientů v daných energetických oblastech je možno vytvořit kompozit s vyšším faktorem zeslabení a zároveň menší hustotou než olovo.

7. ZÁVISLOST REDUKCE DÁVKY NA DRUHU A TLOUŠŤCE VRSTVY STÍNÍCÍHO MATERIÁLU

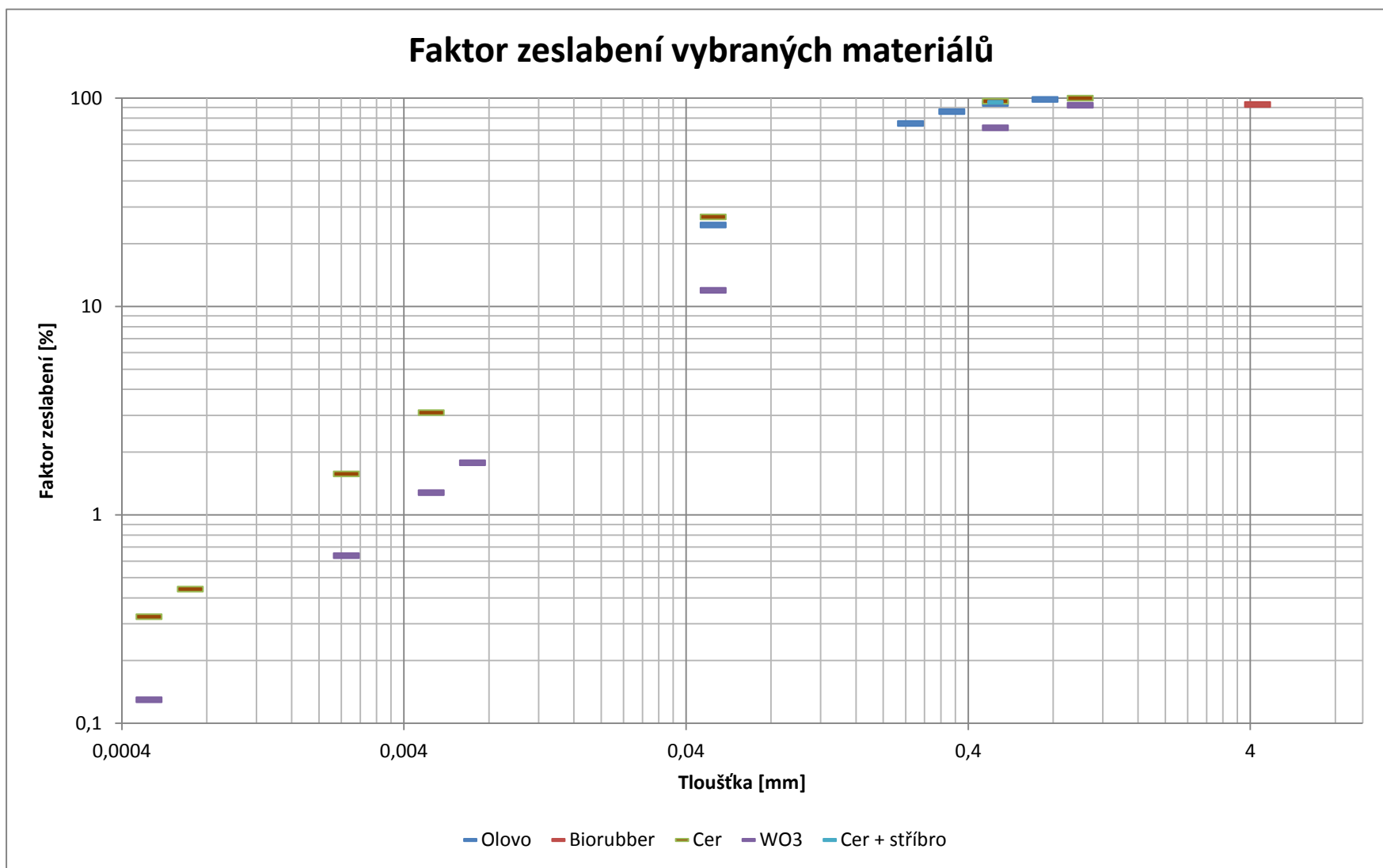
Všechny těžké kovy jsou schopny odstínit ionizující záření. Vystává však problém, jak silná vrstva daného prvku nebo sloučeniny musí být použita.

Graf 14 sumarizuje data získaná simulací záření o energii 60 keV. V dané energetické třídě jsou některé z prvků a sloučenin i ve slabší vrstvě účinnější než olovo. Vhodným příkladem je faktor zeslabení při tloušťce stínící vrstvy 0,05 mm: u olova se odstíní 24,53 % dopadajících fotonů, u ceru je to 26,87 %. U tloušťky 0,5 mm jsou jak Biorubber, olovo, tak i směs ceru a stříbra schopny snížit záření o zhruba 95 %. U samotného ceru je v této tloušťce faktor zeslabení také na úrovni cca 95 %, přidání stříbra tedy nijak nezvyšuje účinnost stínící vrstvy. Zvýšení se projeví v oblasti od 25 keV do 40 keV.

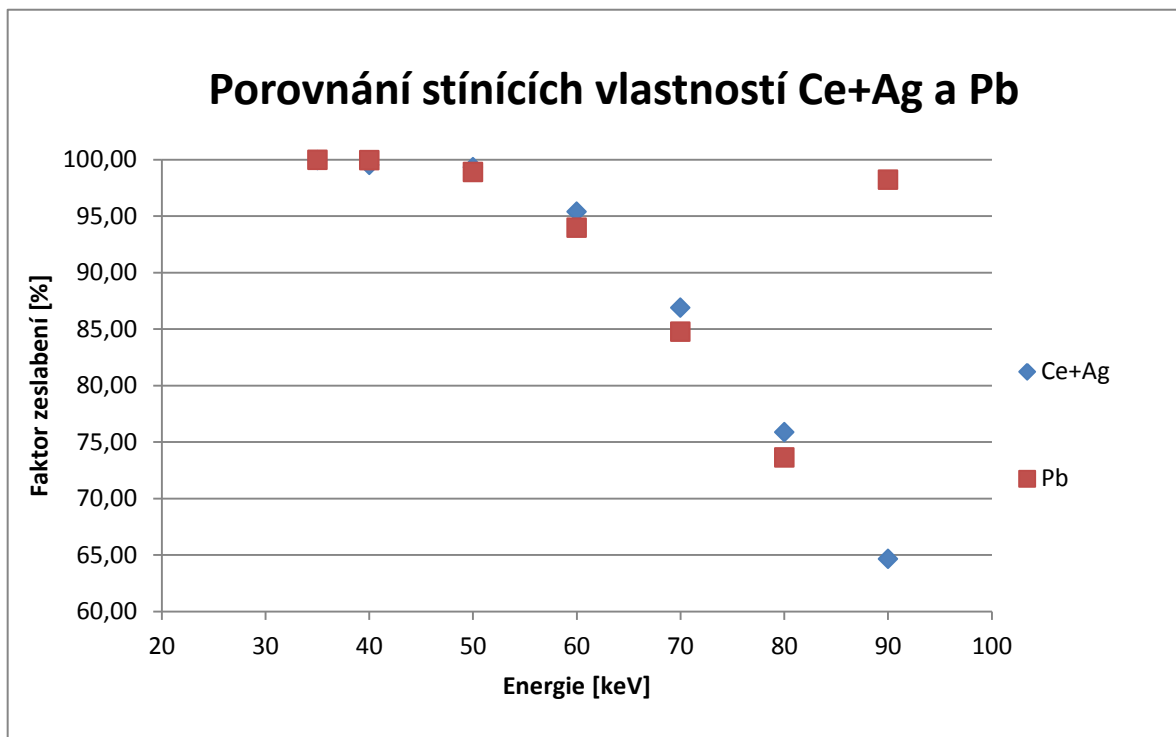
Zajímavé je porovnání stínících schopností materiálu Biorubber a olova. Faktor zeslabení je u obou vzorků u dané energie stejný, je třeba ale upozornit na rozdílnou tloušťku a hustotu vzorku: 4,25 mm a 1,14 g/cm³ u Biorubberu a 0,5 mm a 11,34 g/cm³ u olova.

Tabulka 19: Porovnání FZ olova a Biorubberu [%]

Energie	Olovo 0,5 mm, $\rho=11,34 \text{ g/cm}^3$	Biorubber 4,25 mm, $\rho=1,14 \text{ g/cm}^3$
60 keV	93,97	93,13
150 keV	67,66	73,88
200 keV	42,77	48,61
400 keV	11,94	14,36
660 keV	5,88	7,16
1100 keV	3,51	4,34



Graf 14: Faktor zeslabení vybraných materiálů



Graf 15: Porovnání stínících vlastností Ce+Ag a Pb

Graf 15 srovnává výsledky simulací provedených pro kompozit stříbra a ceru a samotného olova. V Graf 1 byl prezentován nárůst útlumového koeficientu u olova v energetické oblasti okolo 90 keV. Tento teoretický předpoklad byl potvrzen i v rámci simulací. Do této energetické hranice však směs těchto dvou prvků (cer + stříbro) vykazuje srovnatelné, místy vyšší, zeslabovací účinky.

U materiálů z Graf 14 byl proveden odhad váhy případného obleku. Norma ČSN EN 61331-3 (364731) [23] stanovuje rozměry ochranných zástěr, a proto pro kalkulaci hmotnosti zástěry byla použita jedna z velikostních tříd dle této normy: velikost LL, tzv. velká a dlouhá vesta. Velikost ochranného plátu je zde stanovena na výšku 1,2 m a šířku 0,75 m, a to jak na zádech, tak i na přední části těla. Pro každý materiál byla vybrána taková tloušťka, která je schopná odstínit více než 90% dopadajících fotonů o energii 60 keV. U stříbra byla hmotnost zástěry vypočítána pro vrstvu o tloušťce 0,75 mm.

Tabulka 20: Hmotnost zástěry schopné odstínit > 90% záření o energii 60 keV

Materiál	Tloušťka [mm]	FZ [%]	Hustota [kg/m³]	Hmotnost zástěry [kg]
Cer	0,5	96,53	6780	6,1
Cer + stříbro	0,5	95,4		7,77
Olovo	0,5	93,97	11340	10,20
Biorubber	4,25	93,13	1582	12,1
Cer	1	99,81	6780	12,2
WO ₃	1	92,15	7160	12,88
Stříbro	0,75		10490	14,16
Olovo	0,75	98,51	11340	15,31

Z výsledků uvedených v Tabulka 20 mj. vyplývá (pro odstínění záření o energii 60 keV):

- Rozdíl v účinnosti ceru je v případě 1 mm a 0,5 mm jen 3,5% - hmotnost zástěry je přitom dvojnásobná.
- Příměs stříbra k ceru je marginální - stříbro nevykazuje ve zkoumané energetické oblasti výrazně vyšší tlumící schopnosti
- Olověná zástěra daných rozměrů o tloušťce 0,5 mm by vážila 10,2 kg, zástěra z materiálu Biorubber E400 o tloušťce 0,425 mm 12,1 kg.
- Olověná zástěra daných rozměrů o tloušťce 0,5 mm by vážila 10,2 kg, zástěra s cerem o stejné tloušťce jen 6,1 kg, a to s blízkým faktorem zeslabení
- Olověná vrstva 0,5 mm má velmi podobný FZ jako vrstva 0,75 mm, rozdíl ve váze zástěry je však téměř 5 kg.

7.1 IDEÁLNÍ OBLEK

Vzhledem k výše uvedeným poznatkům a měření je zřetelné, že ideální oblek by byl kompromisem mezi komfortními vlastnostmi, účinností ochrany proti účinkům ionizujícímu záření a výrobní cenou.

Z hlediska účinnosti ochrany před účinky ionizujícího záření:

- Princip ALARA (as low as reasonably achievable) vs. princip ALAPA (as low as possibly achievable) - dosažení tak nízkých dávek, jaké jsou přiměřené objektivním

možnostem a potřebám; střední cesta mezi podceňováním rizika na jedné straně a na druhé straně požadavky na zajištění absolutní ochrany a nulových dávek [24].

Z hlediska komfortu nošení mezi hlavní body patří:

- nízká hmotnost výsledného obleku (= nízká plošná hmotnost materiálu)
- co nejvyšší měrná tepelná vodivost λ
- nižší hodnoty tepelného odporu r
- vysoké hodnoty tepelného toku q
- vyhnout se kombinézám - oděv rozdělený na kalhoty a torzní část je z hlediska oblékání výhodnější
- možnost jednoduché dekontaminace, údržby
- integrovaná inteligentní čidla (teplota těla, krevní tlak, zabudovaný dozimetr) - smart textilie

Z hlediska ceny:

- Možnost vícenásobného použití
- Použití cenově dostupných ochranných prvků

Olovené obleky splňují kritérium vysokého stupně ochrany. Když se však v obleku musí jedinec pohybovat delší dobu, případně musí v obleku vykonávat fyzicky náročnější činnost, projeví se negativa použití olova - olovený plát je těžký, neprodyšný, neohebný.

Obleky z materiálů jako je Demron nebo Biorubber se snáze oblékají, neomezují jedince v pohybu, také jejich údržba je snadná. Nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena (v řádech desítek tisíc korun) a prokazatelně nižší stínící schopnosti v porovnání s olovem.

Pečlivý výběr potenciálně účinných prvků, v kombinaci s implementací sloučenin těchto prvků do struktury nanovláken, se zdá být zajímavým a účinným řešením. Pro některé energetické oblasti je možné olovo nahradit prvkem s nižší hmotností nebo vyšší účinností. Simulace interakce záření s hmotou by byla pro rychlejší a efektivnější výběr materiálů jednoznačným přínosem.

ZÁVĚR

V rešeršní části diplomové práce byly v rámci uvedení do problematiky vysvětleny základní pojmy týkající se ionizujícího záření, důraz byl kladen na možnou ochranu před účinky tohoto záření. Byl zhodnocen současný stav možností osobní ochrany se zaměřením na vesty a celotělové obleky. Současným trendem je nahrazování olova, jakožto levného, dostupného a ověřeného prvku, jinými prvky a sloučeninami. Hustota olova je z hlediska ochrany naprosto vyhovující, z hlediska komfortu nošení obleků s všitou olověnou deskou je jeho hmotnost naopak negativní vlastností.

Z hlediska komfortu nošení byly proměřeny čtyři vzorky materiálu Biorubber na přístrojích FX300 (měřící prodyšnost) a Alambeta (měřící měrnou tepelnou vodivost λ , plošný odpor vedení tepla r , měrnou teplotní vodivost a , tepelnou jímavost b a tepelný tok q). Jelikož jsou některé z obleků určeny i pro členy záchranných složek, bylo by výhodné, pokud by materiál, ze kterého je oblek vyroben, alespoň částečně odváděl teplo od těla, nezadržoval pot na těle, ale dokázal ho distribuovat skrze jeho tloušťku ven. Během měření na přístroji Alambeta se vyskytl problém s upevněním vzorku - díky hmotnosti, tuhosti (resp. velmi malé splývavosti) a tloušťce materiálů se však měřená část některých vzorků vypoučila, nadzvedla hlavici a přístroj poté vykazoval chybu v měření. Z důvodu tloušťky nebylo možné provést testy na přístroji Permetest, ani tzv. spray test.

Katedra netkaných textilií FT TUL se zabývá možnostmi aplikace progresivních technologií pro výrobu materiálů k ochraně osob proti působení CBRN látek. Do struktury nanovláken se různými postupy implementuje prášek složený z částic o velikosti zhruba 1000 nm. Tyto suspenze jsou poté pomocí AC a DC electrospinningu zvláknovány. Samotné zvláknování je provázáno problémy, které jsou pravděpodobně spojené s velikostí nebo samotnou přítomností částic v polymeru - proud nanovláken kolabuje, částice některých materiálů silně agregují, je třeba omezit sedimentaci částic [17].

Dostupné materiály byly podrobeny měření na přístroji Falcon 5000®. Jako zdroj záření bylo použito Americium 241, které vyzařuje γ záření s energií 60 keV. U materiálu Biorubber došlo u tloušťky vrstvy cca 0,5 cm ke snížení počtu dopadajících fotonů o 95 %. Ze vzorků poskytnutých Katedrou NT nevykazoval v jedné vrstvě ani jeden ze vzorků

výraznějších tlumících schopností. Pro porovnání byl vzorek Biorubber otestován i zářiči cesium 137 (660 keV) a kobalt 60 (1100 keV). U těchto vysokých energií je faktor zeslabení jen v řádech jednotek procent.

Jako vhodný experiment pro ověření účinnosti sloučenin byla zvolena simulace v programu Fluka. V rámci simulace byl podroben testování opět Biorubber, ale také olovo a některé ze vzorků KNT. U prášku WO_3 bylo zjištěno, že tloušťka vrstvy 0,7 mm dokáže snížit počet dopadajících fotonů o energii 60 keV o cca 86 %, olovo těchto výsledků dosáhne u tloušťky 0,35 mm, a cer je v této energetické třídě dokonce ještě efektivnější. Simulace interakce záření s hmotou se prokázala být účinným prostředkem mj. i ke snížení nákladů spojených s vývojem stínících vrstev. Mnohé vzorky není nutné hned vyrábět, jejich účinnost je možné nejdříve otestovat v některém z programů a až poté přistoupit k samotné výrobě. Výsledky simulace byly pro účely diplomové práce porovnány s výsledky měření a simulace z tohoto srovnání vychází jako spolehlivý mezičlánek mezi návrhem a výrobou práškových materiálů určených pro implementaci do struktury nanovláken, alespoň tedy z hlediska odstínění ionizujícího záření.

Ochranný oblek, který splňuje jak kritéria ochrany osob proti účinkům IZ, tak nároky na oděvní komfort, je prozatím kompromisem mezi těmito dvěma požadavky. Se zvyšujícím se komfortem prozatím klesají stínící schopnosti materiálů. Tento trend je patrný zejména při vyšších energiích záření.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] Cold Fusion. Www.sire.com [online]. sire.com 2010-11 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c4/Table_isotopes_en.svg/2000px-Table_isotopes_en.svg.png
- [3] Radiobiologie | Obsah [online]. [cit. 2015-01-14]. Dostupné z:
<http://fbmi.sirdik.org/>
- [4] Interakce rentgenových fotonů (1). Něco málo o zobrazování a dávkách v radiodiagnostice, ale i mimo ni, aneb co by Vás mohlo zajímat [online]. Lucie Sůkupová, 2016 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/interakce-rentgenovych-fotonu-1/>
- [5] KLENER, Vladislav a Otokar VOJTÍŠEK. Základy hygieny záření. 1. vyd. Praha: Univerzita Karlova Praha, 1989, s. 20-33.
- [6] Biologické účinky ionizujícího záření — Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Aktuality : — Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. [online]. © 2000-2015 [cit. 2015-01-14]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>
- [7] Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. In: 307/2002 Sb. 2002. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/7_307_2002_Sb.pdf
- [8] Demron® Fabric - Hazmat Radiation Protection Suit, Protection Suit Against Gamma Rays & Nuclear Emissions Dr. Ron Demeo inventor of Demron® Demron® Bra for Breast Cancer. COPYRIGHT © RADIATION SHIELD TECHNOLOGIES. RST [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.radshield.com/Demron-RST.php>

- [9] TEIJIN | News | Teijin Develops Radiation Shielding Aramid Fabric. TEIJIN [online]. 2013 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: http://www.teijin.com/news/2013/ebd130424_59.html
- [10] BIORUBBER RSM Radiation Shield Material "Biorubber RSM" : YAMAMOTO CORPORATION. YAMAMOTO CORPORATION [online]. Copyright © 2010 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: http://www.yamamoto-bio.com/yamamoto_e/latest/140200_rsm.html
- [11] Пожарное оборудование - разработка и поставка дыхательных аппаратов, аварийно-спасательного оборудования, специальной защитной одежды, компрессоров. Пожарно-Техническое Объединение "ПОЖТЕХСЕРВИС" - разработка и поставка аппаратов дыхательных со сжатым воздухом, специальной защитной одежды, пожарно-технического и аварийно-спасательного оборудования.: [online]. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://pto-pts.ru/catalog/radio/rzk.php>
- [12] ALPHA TECHNICAL RESEARCH CO. ,LTD | Df series. ALPHA TECHNICAL RESEARCH CO. ,LTD | creating new products based on "voice from customers" [online]. 2014 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://www.alpha-tr.co.jp/global/df.html>
- [13] Nuclear Radiation Overall Clothing YSX1558. Medical X-ray Machine Manufacturer & Supplier - YSENMED [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: http://www.medical-x-ray.com/products/Accessories%20of%20Medical%20X-ray%20Machine/show_935.html
- [14] HES, Luboš a Petr SLUKA. Úvod do komfortu textilií. Liberec: TUL, 2005. ISBN 8070839260.
- [15] Knt - Home [online]. © 2014 knt [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/knt/web/index.php>
- [16] BIRKY, Brian K., JOHNSON, Thomas E. (ed.). Health Hysics and Radiological Health. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams, 2012. ISBN 16-091-3419-2.

- [17] NEVYHOŠTĚNÝ, Stanislav. Integrace anorganických nerozpustných částic do polymerních nanovláken. Liberec, 2014. Bakalářská práce. TUL, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí práce Ing. Jan Grégr.
- [18] The official FLUKA site: About FLUKA. The official FLUKA site: FLUKA home [online]. © FLUKA Team 2000–2015, 21st of May, 2010 [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://www.fluka.org/fluka.php?id=about&mm2=1>
- [19] KRÁLÍKOVÁ, Michaela. KOBALT. Masarykova univerzita [online]. 1996–2015 Masarykova univerzita [cit. 2015-01-14]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/el/1411/podzim2010/VLKB091/um/KOBALT.pdf>
- [20] Falcon 5000® Portable HPGe-Based Radionuclide Identifier - CANBERRA Industries. CANBERRA Industries - Worldwide Leader in Radiation Detectors & Nuclear Measurement [online]. © 2014 CANBERRA Industries Inc. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: http://www.canberra.com/products/hp_radioprotection/falcon-5000.asp
- [21] CHECHEV, V.P. a N.K. KUZMENKO. LABORATOIRE NATIONAL HENRI BECQUEREL. Table de Radionucléides [on-line]. 10/10/2000 - 7/7/2010, 12th January 2015 [cit. 14.1.2015]. Dostupné z: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- [22] KOZLOVSKÁ, Michaela, Radek ČERNÝ a Petr OTÁHAL. Attenuation of X and Gamma Rays in Personal Radiation Shielding Protective Clothing. Health Physics. 2015, vol. 109 (suppl. 3), 205-211. DOI: 10.1097/HP.0000000000000361. ISSN 0017-9078. Dostupné také z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26425983>
- [23] ČSN EN 61331-3 (364731). Ochranné prostředky před lékařským diagnostickým rentgenovým zářením - Část 3: Ochranné oděvy a ochranné prostředky pro gonády. 1. vydání. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [24] Ullmann V: Radiační ochrana. Ullmann V.: "AstroNuklFyzika" - jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filosofie [online]. 2015 [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm#3>

[25] CEMBER, Herman a Thomas E. JOHNSON. Introduction to Health Physics. 4. vyd. USA: McGraw-Hill Companies Inc., 2009. ISBN 0071423087.

[26] MOE, H.J. a E.J. VALLARIO. Operational Health Physics Training. USA: Argonne National Laboratory, 1988. ISBN ANL-88-26.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Mapa izotopů [2].....	15
Obrázek 2: Celotělový oblek z materiálu Demron [12].....	21
Obrázek 3: Řez textilií Demron - osnovní, útkové nitě, stínící vrstva s kovovými částicemi, zátěr na rubové straně, zvětšeno 250x	23
Obrázek 4: Detail zátěru textilie Demron s rozptýlenými částicemi těžkých kovů, zvětšeno 1000x	23
Obrázek 5: Technora fabric [9].....	24
Obrázek 6: Biorubber RSM [10]	24
Obrázek 7: Detail textilie Biorubber RSM E400, osnovní a útkové nitě, zátěr na lící i rubové straně, zvětšeno 250x.....	25
Obrázek 8: oblek RZK [11]	26
Obrázek 9: DF Sheet [4]	26
Obrázek 10: řez materiálem DF Sheet, zvětšeno 100x	27
Obrázek 11: Detail houbovité struktury DF Sheet, zvětšeno 1000x.....	27
Obrázek 12: Nuclear Radiation Overall Protection Wear (YSX1558) [9]	28
Obrázek 13: Povrch YSX1558, zvětšeno 100x	28
Obrázek 14: Detail řezu vláken povrchu YSX1558, zvětšeno 1000x	29
Obrázek 15: Stínící vrstva YSX1558, zvětšeno 1000x.....	29
Obrázek 16: Nanovláknenná vrstva fixovaná mezi vrstvami netkané textilie.....	42
Obrázek 17: Nanovláknenná vrstva fixovaná na netkané textilií	43
Obrázek 18: Měřicí soustava	45
Obrázek 19: Simulovaný prostor	55
Obrázek 20: Simulovaný prostor s testovaným vzorkem	56
Obrázek 21: Grafický výstup z programu FLUKA	57

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Součinitel zeslabení.....	41
Graf 2: Spektrum naměřeného pozadí v zájmové energetické oblasti.....	47
Graf 3: Příspěvek pozadí.....	48
Graf 4: Spektrum při užití materiálu Biorubber (aplikace ^{241}Am).....	49
Graf 5: Vliv $\text{Zr}(\text{WO}_4)_2$ na zeslabení záření ^{241}Am	50
Graf 6: Vliv $\text{Pr}_2(\text{WO}_4)_3$ na zeslabení záření ^{241}Am	50
Graf 7: Vliv $\text{WO}_3(\text{z } (\text{NH}_4)_2\text{WO}_4)_5$ na zeslabení záření ^{241}Am	51
Graf 8: Vliv HfO_2 na zeslabení záření ^{241}Am	51
Graf 9: Stínící schopnost olova při 60 keV.....	59
Graf 10: Faktor zeslabení - experiment, simulace.....	61
Graf 11: Výsledek simulace WO_3	62
Graf 12: Výsledek simulace Ce.....	63
Graf 13: Výsledek simulace Ce + Ag.....	65
Graf 14: Faktor zeslabení vybraných materiálů.....	67
Graf 15: Porovnání stínících vlastností Ce+Ag a Pb.....	68

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Značení vzorků	32
Tabulka 2: Konstrukční parametry materiálu Biorubber	32
Tabulka 3: Propustnost textilií pro vzduch [$l/(m^2 \cdot s)$]	33
Tabulka 4: Měrná tepelná vodivost λ	34
Tabulka 5: Plošný odpor vedení tepla r	35
Tabulka 6: Tepelný tok q	36
Tabulka 7: Měrná teplotní vodivost a	36
Tabulka 8: Tepelná jímavost b	37
Tabulka 9: Příklad připravených sloučenin a jejich hustoty	43
Tabulka 10: Faktor zeslabení testovaných vzorků v energetické oblasti 1 - 100 keV.....	52
Tabulka 11: Faktor zeslabení testovaných vzorků v energetické oblasti 50 - 100 keV.....	53
Tabulka 12: Vliv tloušťky Pb za míru zeslabení, energie 60 keV	58
Tabulka 13: Stínící schopnost 0,5 mm Pb při různých energiích	59
Tabulka 14: Koeficient zeslabení pro Biorubber	60
Tabulka 15: Porovnání změřených a předpokládaných výsledků - Biorubber	60
Tabulka 16: Výsledek simulace WO_3 , hustota $7,16 \text{ g/cm}^3$	62
Tabulka 17: Výsledek simulace Ce, hustota $6,77 \text{ g/cm}^3$	63
Tabulka 18: Faktor zeslabení Ce + Ag při různých energiích, tloušťka vrstvy 0,5 mm.....	64
Tabulka 19: Porovnání FZ olova a Biorubberu [%]	66
Tabulka 20: Hmotnost zástěry schopné odstínit > 90% záření o energii 60 keV	69