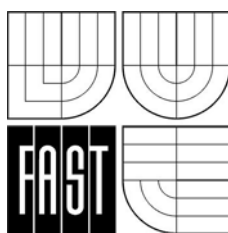


Doc. Ing. Leonard Hobst, CSc.

**ZKUŠEBNICTVÍ A
TECHNOLOGIE**

MODUL BI02-M03
RADIAČNÍ DEFEKTOSKOPIE



Jazyková korektura nebyla provedena, za jazykovou stránku odpovídá autor
© Doc. Ing. Leonard Hobst, CSc.

OBSAH

1	ÚVOD	5
1.1	Cíle	5
1.2	Požadované znalosti	5
1.3	Doba potřebná ke studiu.....	5
1.4	Klíčová slova.....	5
2	Vznik a vlastnosti ionizujícího záření	6
2.1	Druhy záření	6
2.2	Zdroje záření	7
2.2.1	Zdroje záření s trvalou emisí záření (zářiče).....	7
2.2.2	Zdroje s přerušovanou emisí záření	8
2.3	Interakce (vzájemné působení) ionizujícího záření s látkou	9
2.3.1	Interakce fotonů gama s látkou	9
2.3.2	Interakce neutronů s látkou	12
2.4	Veličiny v radiační defektoskopii	14
2.4.1	Aktivita A	14
2.4.2	Expozice X	15
2.4.3	Dávka D.....	15
2.4.4	Dávkový ekvivalent H.....	16
2.5	Detekce ionizujícího záření	17
2.5.1	Ionizační komory.....	17
2.5.2	Geiger-Müllerovy počítáče	17
2.5.3	Scintilační detektory.....	18
2.5.4	Polovodičové detektory.....	19
2.5.5	Filmové dozimetry	20
2.5.6	Termoluminiscenční dozimetry.....	20
3	Radiometrické zjišťování objemové hmotnosti a vlhkosti	21
3.1	Radiometrické zjišťování objemové hmotnosti	21
3.1.1	Metoda průchodu a zeslabení záření gama	21
3.1.2	Metoda rozptylu záření gama	23
3.2	Radiometrické zjišťování objemové vlhkosti (w)	25
3.3	Kombinované radiometrické soupravy	26
3.4	Kalibrace radiometrických souprav	26
4	Radiografie ve stavebnictví	28

4.1	Zdroje záření v radiografii	28
4.2	Záznam obrazu na radiografický film	32
4.2.1	Radiografický film.....	32
4.3	Radiografická kontrola uložení výztuže	39
5	Zdravotní zatížení obyvatelstva zářením	43
5.1	Přírodní pozadí	43
5.2	Biologické účinky záření	44
5.3	Principy ochrany před ozářením.....	44
5.4	Atomový zákon.....	45
6	Autotest.....	46
7	Závěr	46
7.1	Shrnutí	46
7.2	Klíč k autotestu	47
8	8 Seznam použité literatury	48

1 ÚVOD

1.1 Cíle

V této části studijního textu se seznámíte s využitím ionizujícího záření při kontrole stavebních materiálů. Seznámíte se se základními vlastnostmi ionizujícího záření, se způsoby detekce záření a s aplikací záření v radiometrii a radiografii. V závěru této části studijního textu jsou uvedeny i negativní biologické účinky ionizujícího záření, ke kterým může dojít při nedodržení bezpečnostních opatření.



1.2 Požadované znalosti

Pro porozumění studijního textu jsou nezbytné znalosti středoškolské fyziky a matematiky a znalosti o stavebních materiálech, získané v 1. ročníku studia na FAST. Základní údaje jsou v úvodu studijního textu zopakovány a vysvětleny.



1.3 Doba potřebná ke studiu

Doba studia závisí na znalostech čtenáře. Pokud čtenář zvládl v dřívějším studiu základy jaderné fyziky, stačí na studium tohoto studijního textu 6 až 8 hod. studia. Při podrobném studiu základů jaderné fyziky v rámci tohoto modulu je nutno počítat s 12 až 16 hod. studia.



1.4 Klíčová slova

Záření gama, neutronové záření, interakce záření s látkou, detekce záření, rentgeny, gamazářiče, radiometrie, radiografie, kalibrační křivky, biologické účinky záření, atomový zákon



2 Vznik a vlastnosti ionizujícího záření



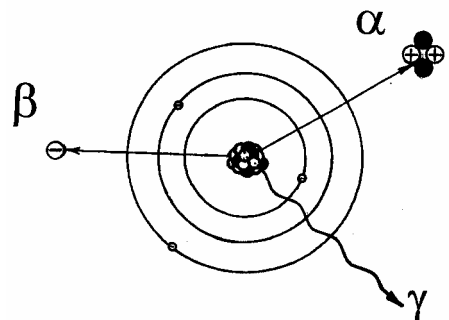
Ionizující záření je druh energie, která vystupuje z některých, v přírodě se vyskytujících radioaktivních prvků, přirozenou cestou a tvoří tzv. přírodní pozadí na Zemi. Až ve 20. století byly postupně vytvářeny postupy pro výrobu umělých radionuklidů a byla vytvořena zařízení, kde ionizující záření vzniká přeměnou energie elektrické (rentgeny). Záření sice působí nepříznivě na živý organismus, ale nalézá dobré uplatnění v průmyslu, např. při urychlování polymerizace plastů, vulkanizaci pryže apod., v zemědělství při ničení škůdců a mutaci užitkových rostlin a zejména v lékařské diagnostice a terapii. Pro potřebu stavebnictví se využívá, jak jsme již uvedli, schopnost záření procházet pevnou látkou, jako podklad pro rozvíjení stále spolehlivějších metod defektoskopie.

2.1 Druhy záření

Záření, které vydávají přirozené i umělé radioaktivní prvky, se označuje jako záření ionizující, protože je schopné vyvolávat v látce volné náboje. Má povahu buď látkovou (korpuskulární), nebo polní (je elektromagnetickým vlněním). Účinky ionizujícího záření jsou zkoumány od počátku 20. století a výsledky jsou shrnuty v řadě publikací např. [2.1], [2.2], [2.3].

Rozeznávají se tři charakteristické druhy záření (obr. 2.1):

- záření alfa (α) - je záření látkové. Tvoří ho jádra hélia ${}^4_2\text{He}$ (heliony), které prudce vyletují z jader mnohých radioaktivních prvků. Z jader prvků jsou přitom odnášeny 4 nukleony z toho dva kladné náboje - protony. Prvek, z něhož vychází záření alfa, přechází proto v prvek s nukleonovým číslem $A-4$ a protonovým číslem $Z-2$.
- záření beta (β) - je také záření látkové. Je tvořeno proudem velmi rychlých záporných elektronů, které vyletují z jader radioaktivních prvků. Tyto prvky se mění v prvek s protonovým číslem $Z + 1$, jejich nukleonové číslo A se nemění.
- záření gama (γ) - je velmi pronikavé (krátkovlnné) elektromagnetické záření. Tvoří je tok fotonů, který vzniká při přeskupení nukleonů v jádře radioizotopu (fotony záření gama jsou srovnatelné s fotony viditelného světla, jsou však nositeli řádově až milionkrát větší energie)
- Zvláštní kategorii tvoří záření neutronové (n), které se u přirozených radioizotopů nevyskytuje. Je to záření látkové, tvořené tokem neutronů, které se uvolňují při různých jaderných reakcích a přeměnách.



Obr. 2.1 - Vznik záření α, β a γ rozpadem radioizotopů.

Ionizující záření podle účinků, které vyvolává, je možné dělit na záření přímo a nepřímě ionizující:

a) **Přímó ionizující zářeni** - tvoří elektricky nabité částice. Jsou to například částice zářeni α , částice zářeni β protony (p), nebo těžší ionty. Předání energie nabité částice látce, kterou prochází, se děje především ionizací a excitací (vybuzením) jejich atomů. Je to důsledek působení sil coulombovské interakce (interakce mezi el. náboji) mezi částicí a elektrony vázanými v atomových obalech. K ionizaci dochází tehdy, je-li energie předaná při takové interakci elektronu větší, než je jeho vazební energie v atomu. Elektron je vytržen z atomového obalu a tím dochází ke vzniku iontového páru. K excitaci dochází, není-li předaná energie dostatečná, takže dochází pouze k přemístění elektronu na některou vyšší energetickou hladinu.

Podél dráhy nabité částice v látce tak vzniká řada iontových párů a excitovaných atomů. Oba procesy jsou primární i při interakci s vyššími molekulárními útvary, kde potom mohou vést i k hlubšímu zásahu do vnitřní struktury daného útvaru, jako je rozbití chemických vazeb nebo biologické účinky ionizujícího zářeni.

b) **Nepřímó ionizující zářeni** - je tvořeno částicemi, které nemají elektrický náboj, a proto nezpůsobují ionizaci a excitaci podél své dráhy. Výsledkem jejich interakce s látkou však je často emise sekundárních nabitých částic, které okolní prostředí ionizují stejně jako k tomu dochází, když do látky vstupují přímó ionizující částice. Tyto sekundární procesy pak umožňují využít detekčních a dozimetrických metod založených na ionizaci a excitaci i pro nepřímó ionizující částice. Nejvýznamnějšími reprezentanty nepřímó ionizujícího zářeni jsou **fotony** a **neutrony**.

2.2 Zdroje zářeni

Obecně se dají zdroje zářeni, používané v radiační defektoskopii, dělit podle toho zda vysílají zářeni nepřetržitě – to jsou radioizotopy, nebo přerušovaně – to jsou rentgeny a urychlovače, závislé na dodávce elektrické energie.

2.2.1 Zdroje zářeni s trvalou emisí zářeni (zářiče)

Koncem 19. století objevil A.H. Becquerel, že jádra některých prvků se samovolně přeměňují a přitom vysílají zářeni. Tento jev nazvali manželé P. a M. Curiovi radioaktivitou. Přirozené radioaktivní prvky se přeměňují ve třech řadách. V řadě urano-radiové, dále aktiniové a thoriové. Nejznámější z nich je řada urano-radiová, jejímž výchozím prvkem je uran, přeměňující se postupně v prvky, z nichž nejvýznamnější jsou radium, potom obávaný plyn radon a polonium. Všechny řady končí již stálým izotopem olova. Později, po objevení a zahájení využívání umělých radioizotopů, vznikla čtvrtá, umělá radioaktivní řada neptuniová.

V počátcích rozvoje radiační defektoskopie se využívaly přirozené radioizotopy, především radium. V současné době však významnější uplatnění nalézají umělé radioizotopy. Umělé radioizotopy, kterých je již známo asi tisíc, vysílají kromě zářeni alfa, beta a gama o různých energiích také pozitrony a dále mohou být zdrojem neutronového a protonového zářeni. Umělé radioizotopy se vyrábí v zásadě třemi způsoby:

- a) ostřelováním prvků v cyklotronu – velmi nákladný způsob
- b) ozařováním prvků v reaktoru – výroba pro průmyslové účely
- c) extrakcí ze štěpných produktů reaktoru – relativně levné radioizotopy

Základní vlastností každého radioizotopu, důležitou z hlediska jeho využití v radiační defektoskopii, je energie emitovaného záření E a poločas rozpadu radionuklidu $T_{1/2}$ (kap. 2.1.4.1). Energie záření se většinou uvádí jako efektivní tj. jako energie monochromatického (o jedné vlnové délce) záření, která má stejné účinky jako záření polychromatické.

Jádro atomu lze symbolicky popsat protonovým číslem Z , které udává počet protonů v jádře (dolní index před chemickou značkou prvku) a nukleonovým číslem A , které udává počet nukleonů (protonů a neutronů) v jádře atomů (horní index před chemickou značkou prvku) např. ${}^{60}_{27}\text{Co}$, ${}^{192}_{77}\text{Ir}$

Poznámka

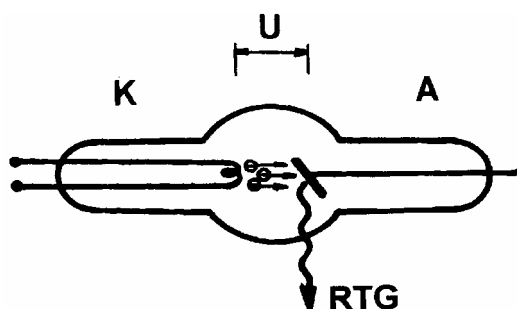


V textu, nikoliv však ve vzorcích, připouští norma ČSN 01 1308 psaní nukleonového čísla ve stejném řádku za chemickou značkou prvku (Co 60, Ir 192)

V radiační defektoskopii se jako zdroje záření gama nejčastěji používají umělé radioizotopy kobalt Co 60, cesium Cs137 a iridium Ir 192

2.2.2 Zdroje s přerušovanou emisí záření

Přerušovanou emisí záření vyvolávají zařízení, ve kterých se elektrická energie přeměňuje v rentgenové (brzdné záření). K nejstarším zdrojům tohoto druhu patří rentgeny a urychlovače. Princip rentgenu byl objeven v roce 1895 Konradem Roentgenem. Základním prvkem přístroje jsou rentgenky, což jsou skleněné vakuované trubice se zabudovanou anodou a katodou (Obr. 2.2). Katoda po zapo-



Obr. 2.2 Schéma vzniku rentgenového záření (K – katoda, A – anoda, U – vysoké napětí, I – proud žhavení vlákna katody, RTG – rentgenové záření)

jení žhavicího zdroje emituje elektrony, které jsou vlivem vysokého elektrického napětí mezi anodou a katodou rentgenky urychlovány směrem k anodě. Po dopadu na anodu se kinetická energie elektronů mění na jiné formy energie – na teplo a energii rentgenového záření. Na teplo se mění přibližně 99,0 % dodané energie, což znamená, že anoda rentgenky je silně zahřívána a vyžaduje účinné chlazení. Na vlastní rentgenové záření se mění pouze 1% dodané energie. Napětí mezi anodou a katodou běžně dosahuje hodnoty 300 kV. Výjimečně se zhotovují stacionární rentgeny pro napětí až 420 kV (podrobněji kap. 2.3.1.1). Rentgenové záření je v podstatě elektromagnetické spojitě záření o velmi krátké vlnové délce v rozsahu 10^{-11} až 10^{-7} m. Pro vyšší energie (10^{-12} až 10^{-15} m) je nutno použít urychlovačů, u kterých jsou elektrony urychlovány

jiným fyzikálním způsobem. Podle způsobu dalšího urychlování elektronů byly vyvinuty dva systémy urychlovačů - kruhový a lineární. Ke kruhovým urychlovačům patří betatrony (kap. 2.3.1.2.1) a mikrotrony (kap. 2.3.1.2.2). Lineární urychlovače urychlují elektrony po přímé dráze (kap. 2.3.1.2.3).

Zdroje s přerušovanou emisí záření umožňují volit optimální energii záření v závislosti na geometrii zkoumané konstrukce a tloušťce prozařovaného materiálu. Jejich velkou výhodou je bezpečnost, neboť po jejich vypnutí přestávají být zdroji ionizujícího záření.

2.3 Interakce (vzájemné působení) ionizujícího záření s látkou

Částice ionizujícího záření, které vstoupí do látky, mohou obecně reagovat jak s elektronovými obaly atomů, iontů či molekul, tak i s atomovými jádry.

O tom, které procesy interakce ionizujícího záření s látkou jsou zastoupeny a v jakém vzájemném poměru, rozhoduje nejen druh a kinetická energie ionizující částice, ale i vlastnosti látky, v níž k interakci dochází, především její složení, t.j. koncentrace a protonové číslo jednotlivých prvků, ze kterých se skládá. Některé efekty, vyvolané v látce ionizujícím zářením, souvisejí však i s její molekulární či krystalickou strukturou.

Z celé řady vzájemného působení ionizujícího záření s látkou jsou pro obor radiační defektoskopie nejvýznamnější interakce fotonů záření gama s látkou a interakce neutronů s látkou.

2.3.1 Interakce fotonů gama s látkou

Interakce fotonů s látkou lze roztrždit do řady skupin vzhledem k tomu, že stupeň a charakter interakce se mění s energií fotonů a s nukleonovým číslem atomů látky. Z nich pro potřebu radiační defektoskopie největší význam má fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl a tvorba párů elektron - pozitron.

a) Fotoelektrický jev

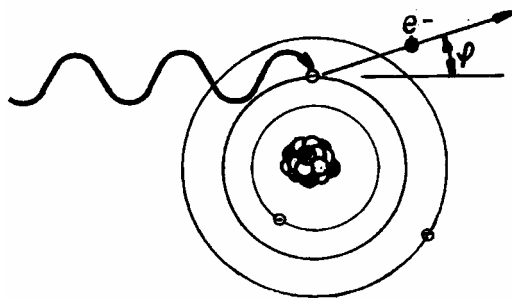
Fotoelektrický jev (fotoefekt) je proces, při kterém foton předá veškerou svou energii elektronu v některé energetické hladině atomu absorbujícího prostředí (obr.6.3). Elektron část získané energie spotřebuje k uvolnění ze své dráhy (vazební energie E_v), zbylá energie se mění na kinetickou energii E_{kin} [MeV] danou Einsteinovou rovnicí:

$$E_{kin} = h\nu - E_v \quad (2.1)$$

kde $h\nu$ - je energie dopadajícího fotonu [MeV],

E_v - je vazební energie elektronu v příslušné energet. hladině [MeV].

Zákon zachování hybnosti je splněn předáním části hybnosti zbylému atomu látky, na kterém došlo k procesu. Proto není fotoelektrický jev možný na volných elektronech. Účinný průřez fotoelektronu je nulový pro energie fotonů menší než vazební energie elektronů v dané slupce atomu, prudce vzroste při

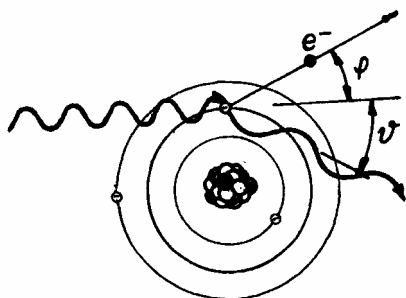


Obr. 2.3 Schematické znázornění fotoefektu (e^- - fotoelektron, φ - úhel vyraženého fotoelektronu)

energii rovné vazební energii a dále postupně klesá s rostoucí energií. Fotoefekt má podstatný podíl z celkového zeslabení záření gama jen do energie asi 1,5 MeV a to i u materiálů vysokých protonových čísel. Pokud mají fotony vysokou energii, bývají fotoelektrony vymrštěny dopředu, t.j. v pokračujícím směru jako dopadly primární fotony. Pokud mají fotony nízkou energii uskutečňuje se emise fotoelektronů převážně ve směrech,

b) Comptonův rozptyl

Comptonův rozptyl (Comptonův jev) nastává pokud energie fotonu záření gama je větší než vazební energie obalového elektronu. Při tomto jevu se fotony chovají jako pružné částice, které při srážce s obalovým elektronem ztratí část své energie (Obr. 2.4).

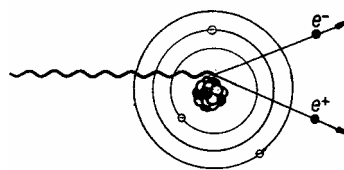


Obr. 2.4 Schematické znázornění Comptonova efektu (e^- fotoelektron, φ - úhel vyraženého fotoelektronu, ν - úhel rozptýleného fotonu)

Při Comptonově rozptylu je tedy část energie fotonu předána elektronu, na který foton narazí, přitom se však foton pohybuje dále, v odkloněném směru od původní dráhy, s nižší energií a takovou hybností, aby byl dodržen zákon zachování energie. Energie rozptýlených fotonů se snižuje v závislosti na úhlu rozptylu. K maximálnímu poklesu energie dochází při zpětném rozptylu ($\nu = 180^\circ$), zatímco k minimálnímu snížení energie dochází pokud úhel rozptylu je roven 0° [2.3]. Při dostatečném počtu srážek nastane takové snížení energie fotonu, které způsobuje, že foton může být nakonec absorbován fotoelektrickým efektem.

c) Tvorba párů elektron - pozitron

Třetím možným procesem interakce fotonů s látkou je tvorba párů elektron-pozitron, která je spojena se zánikem fotonu (obr. 2.5). Energie fotonu se spotřebovává jednak na klidovou energii obou vzniklých částic, jednak na jejich kinetickou energii. Ke tvorbě párů může dojít až po překročení prahové energie $2 \cdot m_{e^0} c^2 = 1,02 \text{ MeV}$



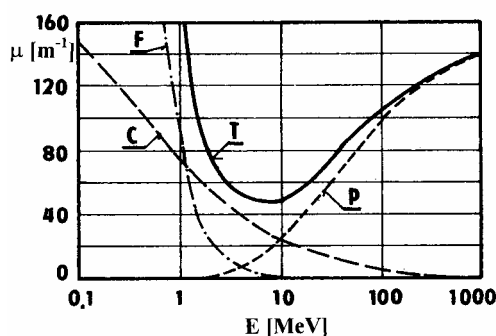
Obr. 2.5 Schematické znázornění tvoření párů elektron (e^-) – pozitron (e^+)

(dvě klidové energie elektronu). K tomuto procesu nemůže dojít bez přítomnosti třetí částice (je to zpravidla atomové jádro, která přijme zbytek hybnosti). Součet hybností elektronu a pozitronu je totiž nižší než hybnost primárního fotonu, takže bez účasti třetí částice by nebyl splněn zákon zachování hybnosti. Této částici se tedy předává i určitá energie, která je však při tvorbě párů v elektromagnetickém poli atomového jádra, zanedbatelná. Její velikost lze odvodit ze zákonů zachování energie. Obecně lze říci, že účinný průřez při tvorbě párů vztažený na atom je úměrný Z^2 (kvadrátu protonového čísla) a roste s energií $h \cdot \nu_0$ fotonu od nuly při prahové energii 1,02 MeV až k hodnotám tak vysokým, že je prakticky jedinou významně se uplatňující interakcí fotonů gama s látkou.

Kinetická energie o hodnotě $E_{kin.} = h \cdot \nu_0 - 2 \cdot m_{eo} \cdot c^2$ se dělí mezi pozitron a elektron. Rozložení této energie na jednu částici je spojitě od nuly až do maximální hodnoty. Další osud obou vzniklých částic je do jisté míry obdobný. Obě ztrácejí svou kinetickou energii v řadě ionizačních a excitačních procesů. Posléze je elektron zachycen některým iontem a dojde k rekombinaci (spojení iontů opačného znaménka), zatímco pozitron při velmi nízké energii anihiluje (zaniká) při srážce s elektronem při současné emisi dvou fotonů o energii 0,51 MeV, orientovaných navzájem proti sobě.

d) Průchod svazku fotonů látkou

Při průchodu svazku fotonů látkou se uplatňují všechny tři popsané procesy, ovšem v závislosti na energii fotonů vždy některý z nich převládá. Oblast důležitosti jednotlivých jevů je charakterizována lineárním součinitelem zeslabení, jehož průběh je znázorněn na obr. 2.6. Výsledný lineární součinitel zeslabení μ je sumou lineárních součinitelů zeslabení jednotlivých procesů.



Obr. 2.6 Vliv fotoefektu (F), Comptonova rozptylu (C) a tvoření párů (P) na celkový lineární součinitel zeslabení (I) pro různé energie záření gama

$$\mu = \tau + \xi + \kappa \quad (2.2)$$

kde jednotlivé symboly τ , ξ a κ jsou lineární součinitele zeslabení pro fotoefekt, Comptonův rozptyl a tvoření párů.

Za idealizovaného předpokladu svazku fotonů, který je kolimován (soustředěn) takovým způsobem, že každý foton, který projde nějakou interakcí, je ze svazku odstraněn, lze pro snížení hustoty toku fotonů vrstvou materiálu o tloušťce x psát rovnici:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.3)$$

kde φ - je hustota toku fotonů dopadajících na povrch této vrstvy [$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] a φ_0 - je původní hustota toku fotonů v nezeslabeném svazku [$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]. Pro reálný široký svazek fotonů, v němž se uplatní za absorbuje vrstvou i fotony rozptýlené Comptonovým efektem, se vztah vynásobí **vzrůstovým faktorem B**, který vyjadřuje příspěvek od rozptýlených fotonů k celkovému efektu za zeslabující vrstvou [2.4]. Vzrůstový faktor se zjistí jako poměr efektu od všech fotonů k efektu od nerozptýlených (primárních) fotonů.

$$B = \frac{\text{efekt vyvolaný všemi fotony}}{\text{efekt vyvolaný primárními fotony}} \quad (2.4)$$

Vztah pro široký svazek pak nabývá podoby:

$$\varphi = B \cdot \varphi_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.5)$$

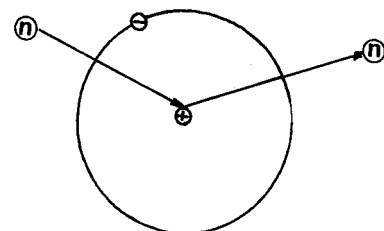
Vzrůstový faktor B závisí obecně na energii primárních fotonů, geometrii svazku záření, materiálu zeslabující vrstvy, tloušťce zeslabující vrstvy i druhu sledovaného efektu (hustota proudu fotonů, dávkový příkon, expoziční příkon, odezva detektoru atp.). Jeho hodnota je vždy větší než 1.

2.3.2 Interakce neutronů s látkou

Neutron jako neutrální částice neionizuje a neexcituje atomy prostředí, kterými prochází. K energetickým ztrátám však dochází v několika procesech interakce s atomovými jádry prostředí. Především je to pružný rozptyl neutronů na jádrech, dále nepružný rozptyl a konečně jaderná reakce, mezi které lze zařadit též radiační záchyt neutronů a štěpení, popřípadě, při velmi vysokých energiích, i tříštění jader [2.4]. Při všech těchto procesech se mohou uvolnit další přímo či nepřímo ionizující částice, jež dále interagují s látkou. Je tedy přenos energie neutronu na látku poměrně složitým procesem, ke kterému může dojít ve značné vzdálenosti od místa vstupu neutronu do této látky. Interakce se uskutečňuje jako pružný, popř. nepružný rozptyl nebo radiační záchyt.

a) Pružný rozptyl

Pružný rozptyl je nejpravděpodobnějším typem interakce rychlých neutronů s látkou. Lze jej popsat na základě klasické mechaniky jako pružnou srážku dvou částic (Obr. 2.7). Při každé srážce s daným rozptylujícím jádrem ztrácí neutron vždy stejný procentní podíl energie. U vodíku například průměrně ubývá energie neutronů, srážejícího se s jádry vodíku při každé srážce o faktor e , t.j. jeho energie po srážce je pouze 37 % energie před srážkou. Naproti tomu neutron ztrácí při pružné srážce s těžkým jádrem (např. uranem) jen mizivě málo energie. Průměrný počet nárazů, které jsou nutné k zabrzdění neutronu o počáteční energii E_a na konečnou energii E_c je označen N :



Obr. 2.7 Schematické znázornění pružného rozptylu neutronu (n)

$$N = \frac{1}{\xi} \cdot \ln \frac{E_a}{E_c} \quad (2.6)$$

kde ξ - je průměrný logaritmický dekrement (útlum) na jeden náraz. Počet srážek N pro zbrzdění neutronu energie 2 MeV na 0,025 eV (termická energie za obvyklých teplot) je u vybraných prvků uveden v tabulce 2.1:

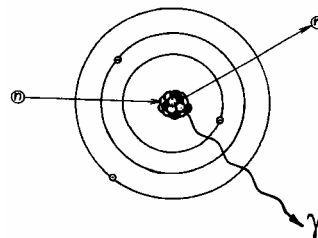
Tab. 2.1 Počet srážek N pro zbrzdění rychlých neutronů na úroveň termálních neutronů

Prvek	1_1H	2_1H	4_2He	9_4Be	${}^{12}_6C$	${}^{12}_8O$	${}^{238}_{92}U$
Srážky N	18	25	43	86	114	150	217

Je-li energie neutronu redukována srážkami na řád termické energie jader brzdícího prostředí, zůstává potom tento neutron s termickou energií až do doby než je absorbován radiačním záchytem.

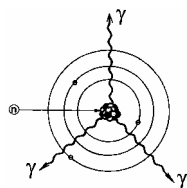
b) Nepružný rozptyl

V některých případech, zejména při vyšších energiích neutronů, dochází k nepružnému rozptylu neutronů, který je možné popsat jako jejich dočasný záchyt a znovuemisi jádrem. Neutron při tomto procesu ztrácí energii a zanechává odražené jádro v excitovaném stavu X' . Nepružný rozptyl lze tedy psát ve tvaru $X(n, n) X'$. Při nepružném rozptylu se část energie dopadajícího neutronu mění v jeden nebo několik fotonů záření gama. Význam nepružného rozptylu spočítá v tom, že neutron je při nepružném rozptylu silně brzděn (obr. 2.8), protože ztrácí jednak energii odevzdanou jádru nárazem při srážce, jednak energii ekvivalentní emitovanému záření gama.



Obr. 2.8 Schematické znázornění nepružného rozptylu (n)

Nepružný rozptyl nastává jen tehdy, je-li energie dopadajícího neutronu větší než energie nejnižšího excitačního stavu terčového jádra nad jeho základní stav. U prvků středního a vysokého nukleového čísla bývá to obvykle 0,1 až 1,0 MeV. Význam nepružného rozptylu vzrůstá se vzrůstajícím nukleonovým číslem, neboť těžká jádra mají větší počet energetických hladin, hladiny jsou širší a rozpětí mezi základním stavem a první energetickou hladinou je menší. Například prahová energie u kyslíku je 6 MeV, zatímco u uranu je nepružný rozptyl možný již při energii několika desetin MeV (pro wolfram je prahová energie 0,2 MeV). U vodíku nepružný rozptyl není možný vůbec.



Obr. 2.9 Schem. znázor. radiačního záchytu (n)

c) Radiační záchyt

Při radiačním zachycení neutronu jádro atomu pohltí pomalý neutron. Tím se vytvoří spojené jádro, které je v excitovaném (vzbuzeném) stavu. Takto složené jádro emituje svou přebytečnou energii ve formě jednoho nebo několika fotonů, čímž přejde nakonec opět do

nezářícího stavu (obr. 2.9). Vyzářené fotony nazýváme zářením gama z radiačního zachycení neutronu. Proces radiačního zachycení lze psát ve tvaru:



Z této rovnice je vidět, že výsledné jádro - produkt reakce - je opět izotopem prvku terčového jádra, který však má nukleonové číslo o jedničku vyšší. Vyzářená energie ve formě fotonu se rovná vazební energii neutronu. Obvykle se tato energie odevzdá bezprostředně (10^{-14} sekundy), v podobě jednoho nebo několika fotonů gama. Radiační záhyt, který je zpravidla poslední fází absorpce neutronu v látce, lze psát stručně ve tvaru $X(n,\gamma)Y$.

2.4 Veličiny v radiační defektoskopii

Veličiny a jednotky charakterizují zdroje ionizujícího záření, pole záření a působení tohoto záření na látku. O veličinách a jednotkách se mluví ve vzájemné souvislosti, vyjadřují však dva zásadně odlišné pojmy.

Veličinou - nazýváme každý kvantitativní pojem, který se vyskytuje ve fyzikálních vztazích a rovnicích. Tyto vztahy existují objektivně a objektivně existují i veličiny, které tyto vztahy charakterizují. Počet veličin tedy nelze omezit a předem stanovit.

Jednotkou - nazýváme určitou část veličiny, kterou jsme zvolili za základ jejího měření. Jednotka vzniká tedy konvencí. Jejím základem je definice, umožňující přesné vymezení jednotky [6.5].

2.4.1 Aktivita A

Míra vydatnosti (emise) zářiče, udávající střední počet těch atomů radionuklidu v zářiči, u nichž během jedné sekundy nastane samovolná radioaktivní přeměna se nazývá aktivita. Je definována vztahem:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.8)$$

kde dN - je střední počet atomů přeměněných v časovém intervalu dt .

Pro jednotku aktivity byl přijat název **becquerel** s označením Bq [s^{-1}].

Aktivita zářiče se vlivem rozpadu radioaktivních atomů v zářiči s časem snižuje. Přitom poměrný úbytek atomů v určitém časovém intervalu ve srovnání s množstvím atomů na začátku intervalu je ve stejném radionuklidu vždy konstantní.

Tento úbytek je charakterizován **přeměnovou konstantou** λ (lambda), která vyjadřuje pravděpodobnou délku časové jednotky, ve které dojde k přeměně atomu daného radionuklidu.

Rozpad zářiče probíhá podle rozpadového zákona:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.9)$$

kde A_t - aktivita zářiče v čase t [s^{-1}],
 A_0 - aktivita zářiče při začátku pozorování [s^{-1}],
 e - základ přirozených logaritmů [1],
 t - doba, která uplynula od začátku pozorování [s],
 λ - přeměnová konstanta, charakteristická pro daný radionuklid [s^{-1}]

Kromě přeměnové konstanty λ se dá úbytek aktivity zářiče charakterizovat **poločasem přeměny** $T_{1/2}$. Je to střední doba, v níž se z počátečního počtu atomů daného radionuklidu samovolně přemění jejich polovina (aktivita se sníží na polovinu).

Mezi přeměnovou konstatou λ a poločasem přeměny $T_{1/2}$ platí vztah

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.10)$$

2.4.2 Expozice X

Vyjadřuje ionizační účinky fotonů ve vzduchu. Je definována jako podíl absolutní hodnoty celkového elektrického náboje dQ iontů jednoho znaménka, vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony ve vzduchu o hmotnosti dm , a této hmotnosti:

$$X = \frac{|dQ|}{dm} \quad (2.11)$$

Jednotkou expozice v soustavě SI je coulomb na kilogram [$C \cdot kg^{-1}$]

Poznámka

Expozice je definována pouze pro jeden druh záření - záření fotonové a jeden druh materiálu - vzduch.



Expoziční příkon \dot{X} Je definován jako podíl přírůstku expozice dX v časovém intervalu dt a tohoto časového intervalu

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (2.12)$$

Jednotkou expozičního příkonu v soustavě SI je ampér na kilogram nebo coulomb na kilogram za sekundu ($[A \cdot kg^{-1}]$ nebo $[C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$).

2.4.3 Dávka D

Je veličinou, která charakterizuje absorpci energie v daném elementárním objemu. Je definována jako podíl střední sdělené energie dE , předané ionizujícím zářením látce a hmotnosti dm této látky

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.13)$$

Jednotkou dávky v soustavě SI je **gray** (Gy), rozměr jednotky je $[J \cdot kg^{-1}]$.

Dávkový příkon \dot{D} je definován jako podíl přírůstku dávky dD v časovém intervalu dt a tohoto intervalu

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.14)$$

Jednotka dávkového příkonu v soustavě SI je gray za sekundu ($\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$) rozměr jednotky je $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$.

2.4.4 Dávkový ekvivalent H

Je veličina, která charakterizuje významnější škodlivé účinky ozáření některými druhy záření na zdraví.

Je definován jako součin dávky D v uvažovaném bodě tkáně, jakostního činitele Q v tomto bodě a popřípadě též součinu ostatních modifikujících činitelů N

$$H = D \cdot Q \cdot N \quad (2.15)$$

(v současné době se uvažuje $N = 1$).

Jednotkou dávkového ekvivalentu v soustavě SI je **sievert** (Sv) o rozměru $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$.

Jakostní činitel Q - je modifikující činitel závažnosti absorbované dávky, který udává, kolikrát má větší biologické působení absorbovaná dávka určitého druhu záření než stejně velká absorbovaná dávka rentgenového nebo gama záření. Udává se bezrozměrným číslem (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Hodnoty jakostního činitele Q dle ČSN 01 1308

Druh záření	Hodnoty činitele jakosti Q
- fotony gama a X, elektrony	1
- neutrony (o neznámém energetickém spektru)	10
- nabitě částice o neznámé energii a klidové hmotnosti větší než jedna atomová hmotnostní jednotka	10
- částice alfa a částice s více než jedním nábojem nebo neznámým nábojem a s neznámou energií	20

Příkon dávkového ekvivalentu \dot{H}

Je definován jako podíl přírůstku dávkového ekvivalentu dH v časovém intervalu dt a tohoto časového intervalu

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (2.16)$$

Jednotka příkonu dávkového ekvivalentu v soustavě SI má název sievert za sekundu, značku $\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$ a rozměr je $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$.

2.5 Detekce ionizujícího záření

Úkolem dozimetrie v radiační defektoskopii je určování dávek ionizujícího záření ve sledovaném prostředí a vymezení míst se zvýšeným dávkovým příkonem záření. Jedná se téměř výhradně o rentgenové záření a záření gama. Záření alfa, záření beta a neutronové záření se používá jen na speciálních pracovištích, která jsou pro detekci tohoto záření vybavena zvláštními dozimetrickými přístroji. Též se neuvažuje s vnitřní a vnější kontaminací zamořením osob. K hlavním úkolům dozimetrie patří sledování pracovníků se zářením, a jednotlivců z obyvatelstva, aby u nich nebyly překročeny příslušné limity dávkového ekvivalentu.

Ionizující záření má, jak již bylo zmíněno, velmi nepříznivé biologické účinky a jeho nebezpečí spočívá především v tom, že je našimi smysly nepostížitelné. Měřicí metody mohou být založeny pouze na využití různých způsobů interakce ionizujícího záření s látkou. Využívá se například ionizace plynů nebo některých pevných látek, luminiscence ozářených materiálů, zčernání fotografických emulzí vyvolané zářením, radiačního rozkladu chemických látek a podobně.

Přítomnost ionizujícího záření se zjišťuje detektory, které lze v principu rozdělit do dvou základních skupin. Do první se řadí **kontinuální detektory**, podávající průběžně informace o okamžité hodnotě detekovaného záření (dávkovém příkonu). K této skupině patří ionizační komůrky, G-M počítače, scintilační detektory a polovodičové detektory. Do druhé skupiny pak patří **integrální dozimetry**, které poskytují údaj za celou dobu ozařování (dávku) ale neumožňují zjistit, zda a jak se záření v dané době měnilo. Nejčastěji používané dozimetry této skupiny jsou dozimetry filmové a termoluminiscenční. V další části budou popsány běžně používané detektory obou skupin [2.4].

2.5.1 Ionizační komory

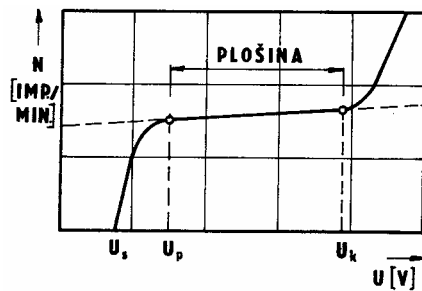
Nejstarší a dosud běžně používané metody registrace záření jsou založeny na ionizujících účincích záření v plynech. Plyny nemají za obvyklých podmínek volné elektrické náboje a nevedou elektrický proud. Aby u nich ionizace mohla vzniknout, musí být obalovému elektronu dodána energie, kterou se tento vyraží z atomu nebo molekuly. Tím vzniknou dva ionty obráceného znaménka, označené jako iontový pár (kap.2.1.3.1.1 – 2.1.3.1.2) Potřebná energie je získávána z dopadajícího záření, které může být jak fotonové tak i látkové.

Z konstrukčního hlediska jsou ionizační komory v podstatě plynové (vzduchové) kondenzátory, které jsou vystaveny ionizačním účinkům záření a pracují v oblasti nasyceného proudu. Působením ionizujícího záření zde vzniká ionizační proud, kterým se komůrka vybíjí a velikost ionizačního proudu se vhodným způsobem měří.

2.5.2 Geiger-Müllerovy počítače

Geiger-Müllerovy (G–M) počítače pracují v Geigerově oblasti (400 - 1400 V), která je charakterizována tím, že všechny impulsy v G-M počítači vzniklé jsou stejně velké, nezávislé na energii dopadající částice, která je vyvolala. Velikost

impulsů může dosahovat stovek i tisíců voltů (podle pracovního napětí), zatímco proud z ionizační komory je řádu stovek mikroampérů .



Obr. 2.10 Charakteristika G-M počítáče (U_S – napětí startovací, U_P – napětí počáteční, U_K – napětí koncové)

Vlastní G-M počítáč tvoří skleněná trubice, ve které je kovová válcová katoda a anoda, zhotovená z wolframového nebo platinového drátu, která prochází osou trubice.

Iontové páry, vzniklé v plynové náplni trubice dopadem částice ionizujícího záření, jsou prudce přitahovány k příslušným elektrodám a při svém pohybu ionizují další molekuly plynové náplně takže dochází k lavinovité ionizaci.

Napěťový impuls, který vznikne lavinovitým výbojem v trubici má jistou dobu trvání. Trubice nemůže normálně pracovat dokud lavinovitý výboj neskončí.

Protože je nutno trvání impulsu, t.j. uzavírací dobu (mrtvý čas) co nejvíce zkrátit, je třeba přerušit výboj co nejrychleji. To lze provést buď mimo trubici samou, vhodnou úpravou elektronického zařízení, které počítáč doplňuje, nebo vhodnou volbou plynové náplně trubice. Takovou „samozhášecí“ trubici dostaneme, přidáme-li k základní náplni, kterou tvoří inertní plyny (argon) o tlaku 13,3 MPa, organické (alkoholové) nebo halogenové páry. Uzavírací doba běžných počítáčů má hodnotu 100 až 200 μ s.

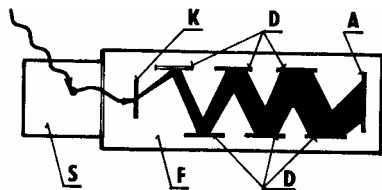
Pro správnou činnost G-M počítáče je nutné volit vhodné napětí, které zjistíme, když vyšetříme závislost četnosti impulsů registrovaných počítáčem (při stálém záření) na napětí mezi elektrodami. Tato závislost, znázorněná graficky se nazývá charakteristika

G-M počítáče. Typický průběh této křivky je na obr. 2.10. Počítáč začne dávat impulsy, až když napětí dosáhne jisté minimální hodnoty - napětí startovací U_S . Se zvyšujícím se napětím četnost impulsů rychle vzrůstá až do napětí U_P , které se nazývá počáteční. Při dalším zvyšování napětí stoupá u kvalitních trubic četnost impulsů jen velmi zvolna (asi o 5 % na 100 V), avšak při napětích vyšších než představuje tzv. koncové napětí U_K je nárůst četnosti značný a dochází k neopravitelnému poškození detektoru. Přibližně vodorovná část charakteristiky se nazývá plošina (sedlo, plató) a má rozsah až několik set voltů. Pracuje-li trubice ve středu této plošiny, je četnost impulsů prakticky nezávislá na napětí (pracovním napětí) [2.1].

2.5.3 Scintilační detektory

Scintilační detektory jsou založeny na vlastnostech některých organických i neorganických látek, které dopadající ionizující záření přeměňují na dlouhovlnné fotony viditelného světla, umožňující registraci fotonásobičem.

Jako scintilátor se nejčastěji používá krystal jodidu sodného aktivovaný thalliem NaI (Tl), popř. sulfid zinečnatý aktivovaný stříbrem ZnS (Ag) nebo mědí ZnS (Cu).



Obr. 2.11 Schéma scintilačního detektoru (S – scintilátor, F – fotonásobič, K – fotokatoda, D – urychlující dynody, A – sběrná anoda)

Scintilační počítače se skládají ze scintilátoru, fotonásobiče a registračního zařízení se zdrojem napětí. Činnost scintilátoru a fotonásobiče je schématicky znázorněna na obr. 6.11. Scintilátor (S) je opticky spojen s fotonásobičem (F). Část fotonů, vzniklých luminiscencí ve scintilátoru, dopadá na fotokatodu násobiče (K), odkud vyráží fotoelektrony. Ty jsou usměrňovány (fokusovány) a zvyšujícím se elektrickým napětím urychlovány k vhodně umístěným dynodám (D), které mají tu vlastnost, že vysílají více elektronů než na ně dopadne (tři až pět elektronů na jeden dopadající elektron). Na konci řetězce deseti dynod může být dosažené zesílení elektronů až 10 milionů. Zesílené elektrony dopadají na sběrnou anodu (A), kde se vytváří napěťový impuls, který se zesiluje a dále elektricky zpracovává. Napěťový impuls má důležitou vlastnost - je úměrný energii registrované částice. Proto je možno scintilačních počítačů používat jako spektrometrů záření. Další výhodou těchto počítačů je krátkodobost fluorescenčních záblesků a velká citlivost, 5 až 10 krát větší než u G-M počítačů.

2.5.4 Polovodičové detektory

Polovodičové detektory je v podstatě možno považovat za určitý ekvivalent ionizačních komor [2.6]. Detekční medium je však tvořeno tuhou látkou - polovodičem. Jedna z hlavních výhod polovodičových detektorů spočívá v řádově menší energii potřebné na vytvoření jedné dvojice „elektron-díra“, než je energie potřebná k uvolnění iontového páru u detektoru plněného plynem. Kromě toho hmotnost polovodičových materiálů je přibližně tisíckrát větší než je hmotnost plynů. Dosah částic v polovodičových detektorech je proto podstatně menší, takže k úplnému zabrzdění detekovaných částic postačí detektory o značně menších rozměrech. Díky tomu polovodičové detektory vykazují nejen velkou energetickou rozlišovací schopnost, ale také i dobrou detekční účinnost. Vysoké energetické rozlišovací schopnosti germaniových detektorů (dále Ge) se využívá při konstrukci spektrometrických analyzátorů. Germaniový detektor spolu s nábojovým předzesilovačem je zde uložen v Dewarové nádobě, kde pracuje při teplotě bodu varu kapalného dusíku (770 K). Tak se dosahuje energetického rozlišení, které je blízké teoretickým hodnotám 1,8 keV pro energii 1,33 MeV.

Při pokojových teplotách pracují polovodičové detektory na bázi křemíku obvykle driftovaného lithiem. Jejich energetická rozlišovací schopnost je však 2 až 3 krát menší, než u germania a také jejich citlivost, vzhledem k nižší hustotě křemíku oproti germaniu, je menší.

Křemíkové detektory se užívají v osobní dozimetrii, při měření radonu, při měření objemové hmotnosti stavebních materiálů a ve speciálních aplikacích (rentgenová tomografie).

2.5.5 Filmové dozimetry

Působením ionizujícího záření vzniká ve fotografické emulzi latentní (skrytý) obraz, který se může po vyvolání a ustálení pozorovat a měřit. Na tomto principu jsou založeny filmové dozimetry, jako používané prostředky osobní dozimetrie [2.7]. Skládají se z dozimetrické kazety a z vlastního filmového detektoru, tvořeného dvěma filmy ve světlotěsné kazetě. Zatímco první film lze využít v rozsahu dávek záření gama 0,1 mGy až 150 mGy, druhý navazuje na uvedený rozsah v oblasti 100 mGy a lze ho použít až do dávek 5 Gy.

Dozimetrická kazeta tvoří plastové pouzdro, v němž jsou vedle prázdného pole párově umístěny filtry z mědi (tloušťky 0,05 mm, 0,5 mm a 1,6 mm) a olova (0,5 mm). Využívá se také filtrace samotným obalem z plastu, která umožňuje odlišení záření beta a záření gama. Uvedené filtry slouží k určení druhu a energie záření, které na dozimetr dopadlo. Z obrazu na filmu lze též usuzovat na převažující úhel dopadu. Dozimetrický film, vložený do kazety, je očíslovaný znakem, jehož číslo je viditelné i po vyvolání.

Reprodukovatelnost výsledků závisí do jisté míry na měřené dávce a spektru záření. Není však nikdy horší než $\pm 25\%$, obvykle je však lepší než $\pm 10\%$.

2.5.6 Termoluminiscenční dozimetry

Termoluminiscenční dozimetry využívají vlastností některých krystalů (LiF, CaF₂, MgF₂/Mn), schopných ukládat určitou část z absorbované energie ionizujícího záření do jejich krystalové mřížky, z níž je při zahřátí krystalu vyzářena jako luminiscenční světlo. Množství tohoto světla se měří pomocí fotonásobičů a je úměrné obdržené dávce ionizujícího záření.

Pro osobní dozimetrii se nejčastěji používají termoluminiscenční prstové dozimetry. Mají tvar prstýnku z plastu, do jehož prohlubně se umísťuje aluminofosfátové sklo s termoluminiscenčními vlastnostmi tvaru disku o průměru 8 mm a tloušťce 1 mm. Detektor je závislý na energii záření a proto je pro energetickou kompenzaci kryt olověnými filtry o tloušťce 0,3 mm. Dozimetr registruje dávky záření gama v rozsahu 0,1 mGy až 15 Gy pro energii 60 keV až 3 MeV.

K vyhodnocování se používá poloautomatických termoluminiscenčních zařízení, která pracují obvykle při teplotě 330 °C v dusíkové atmosféře. Při optimálním čase ohřevu se vysvítlí kolem 60 % celkové akumulované emise, jejíž velikost je automaticky digitálně vyhodnocována. Velikost dávky záření gama je určena s chybou menší než $\pm 15\%$.

Kontrolní otázky:



1. *V čem je rozdíl mezi látkovým a elektromagnetickým zářením?*
2. *Při jakých jevech dochází k ionizaci plynu?*
3. *K čemu dochází při radiačním záchytu neutronů?*
4. *Co je poločas přeměny $T_{1/2}$?*
5. *Co je náplň Geiger-Müllerových počítačů a k čemu se používají?*

3 Radiometrické zjišťování objemové hmotnosti a vlhkosti

Radiometrie se používá všude tam, kde měření objemové hmotnosti a vlhkosti klasickými metodami (měřením objemu a vážením) jsou pomalá nebo technicky vůbec nerealizovatelná. Radiometrické měření umožňuje stanovit okamžitou hodnotu objemové hmotnosti a vlhkosti stavebních materiálů bez jeho porušení [2.8]. Používá se proto při kontinuálním měření objemové hmotnosti a vlhkosti sypaných materiálů (např. kameniva do automatických betonáren) a dále při určování hutnosti čerstvých betonových směsí, aby byla garantována požadovaná objemová hmotnost betonu po jeho zatuhnutí (např. při výstavbě stínících konstrukcí jaderných elektráren a urychlovačů) [2.1]. Široké uplatnění mají radiometrické metody i v inženýrské geologii .



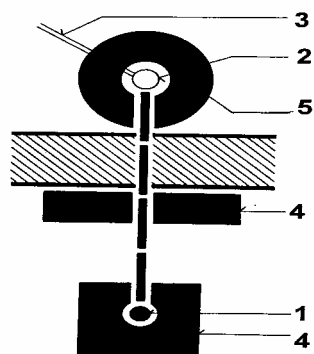
3.1 Radiometrické zjišťování objemové hmotnosti

Radiometrie objemové hmotnosti je založena na principu průchodu a zeslabení záření gama a na principu rozptylu záření gama v měřeném materiálu.

Jako zdroje záření gama se nejčastěji používá cesium Cs 137 a kobalt Co 60. Detektory záření jsou buď Geiger – Müllerovy počítače (kap. 2.1.5.2), nebo scintilační detektory, které jsou spojeny s vyhodnocovací jednotkou. Výsledkem měření je četnost impulsů za časovou jednotku, kterou je třeba pomocí kalibrační křivky převést na objemovou hmotnost. U moderních přístrojů je kalibrační křivka ve vyhodnocovací jednotce naprogramována a výsledky měření jsou udávány v kilogramech na krychlový metr. Přesnost měření je předepsána normou a činí pro celý rozsah měřených objemových hmotností $\pm 20 \text{ kg.m}^{-3}$. Pro docílení této přesnosti je nutno odečíst alespoň 10 000 impulsů za dobu menší než 3 minuty. Tomuto požadavku musí být podřízeno geometrické uspořádání detekčních jednotek a velikost aktivity zářiče. Konstrukčně jsou detekční jednotky řešeny tak, že zářič je při transportu umístěn ve stínícím krytu, ze kterého se při měření vysouvá do pracovní polohy

3.1.1 Metoda průchodu a zeslabení záření gama

Při použití metody průchodu a zeslabení záření gama je zdroj záření a detektor umístěn na protilehlých stranách prověřované konstrukce nebo vzorku. Výsledkem měření je průměrná objemová hmotnost materiálu mezi zdrojem záření a detektorem. Touto metodou se dosahuje velmi přesných výsledků měření. Při proměření materiálu o plošné hmotnosti $\rho_A = 400$ až 1000 kg.m^{-2} (to odpovídá vrstvě betonu 0,17 až 0,425 m) se zpravidla volí zářič Co 60, kdežto při plošné hmotnosti materiálu $\rho_A \leq 400 \text{ kg.m}^{-2}$ se volí zářič Cs 136. Nezbytnou podmínkou je však zachování stálého geometrického uspořádání zářič – detektor. Podle tohoto uspořádání jsou charakterizovány následující radiometrické soupravy:



Obr. 3.1 Schéma radiometrického měření v úzkém svazku (1 – gamazářič, 2 – detektor, 3 – výstup k vyhodnocovací jednotce, 4 – kolimátor zářiče, 5 – kolimátor detektoru)

a) Radiometr. souprava pro měření v úzkém (kolimovaném) svazku

U těchto radiometrických souprav (obr. 3.1) je proměřována objemová hmotnost resp. plošná hmotnost materiálu úzkým (kolimovaným) svazkem záření (tangens úhlu kužele svazku $\leq 0,1$). Kolimace svazku je docílena stínícími clonami z těžkého materiálu.

Pro zeslabení záření při průchodu materiálem platí exponenciální rovnice (2.3) pro úzký svazek, která je při měření plošné hmotnosti modifikována tím, že místo lineárního součinitele zeslabení μ , který je závislý na objemové hmotnosti ρ prozařovaného materiálu a energii záření E , je použito hmotnostního součinitele zeslabení μ_m , který je závislý pouze na energii záření E (platí

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho_A} \quad (3.1)$$

kde N - četnost impulsů po průchodu materiálem [s^{-1}],
 N_0 - četnost impulsů nezeslabeného svazku záření [s^{-1}],
 e - základ přirozených logaritmů [1],
 μ_m - hmotnostní součinitel zeslabení [$m^2 \cdot kg^{-1}$],
 ρ_A - plošná hmotnost materiálu [$kg \cdot m^{-2}$]

Objemová hmotnost zkoušeného materiálu se následně určí ze vztahu:

$$\rho = \frac{\rho_A}{d} \quad (3.2)$$

ρ - objemová hmotnost materiálu [$kg \cdot m^{-3}$],
 d - tloušťka materiálu [m]

Těchto radiometrických souprav se používá především v laboratorních podmínkách pro přesné proměřování objemové hmotnosti různých vzorků materiálu (např. získaných z jadrových vrtů).

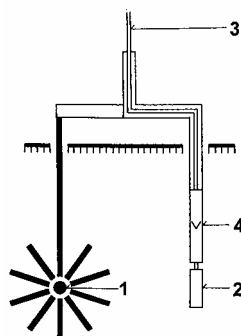
b) Radiometrická souprava lyzimetrická

U radiometrických souprav lyzimetrických je zdroj záření gama a detektor umístěn odděleně a do zkoušeného materiálu se vpichují nebo se zasouvají do dvou paralelních vrtů ve vzdálenosti 0,2 - 0,3 m. Konstrukce detekční jednotky musí být volena tak, aby geometrie zářič – detektor byla neměnná. Pro zeslabení záření při průchodu materiálem platí modifikovaná rovnice pro široký svazek záření ve tvaru:

$$N = B \cdot N_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho_A} \quad N = B \cdot N_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho_A} \quad (3.3)$$

kde N - četnost impulsů po průchodu materiálem [s^{-1}],
 B -vzrůstový faktor [1],
 N_0 - četnost impulsů nezeslabeného svazku záření [s^{-1}],
 μ_m - hmotnostní součinitel zeslabení [$m^2 \cdot kg^{-1}$],
 ρ_A - plošná hmotnost materiálu [$kg \cdot m^{-2}$].

Tyto radiometrické soupravy jsou vhodné pro měření objemové hmotnosti jednotlivých vrstev zemin, štěrků a čerstvého betonu. Jsou uzpůsobeny pro měření v hloubkách 0,2 až 1,0 m.



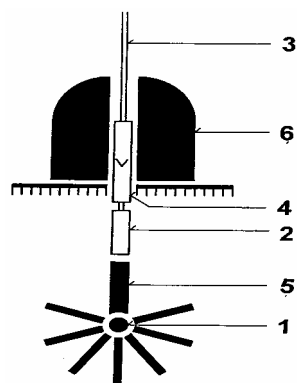
Obr. 3.2 Schéma lyzimetrické soupravy (1 – gamazářič, 2 – detektor, 3 – výstup k vyhodnocovací jednotce, 4 – předzesilovač)

c) Radiometrická souprava vpichovací

U radiometrických souprav vpichovacích je zářič v pažnici vpichován do materiálu nebo zasouván do vývrtu v materiálu a detektor zůstává na povrchu. Pro zeslabení platí opět modifikovaná rovnice pro široký svazek. Detekční jednotky měří průměrnou objemovou hmotnost ve vrstvě mezi zářičem a detektorem. Hloubka vpichu se pohybuje od 0,05 do 0,4 m. Tyto radiometrické soupravy se používají pro měření objemové hmotnosti čerstvých betonových směsí, písků, zemin a ztuhnutí asfaltových vrstev. Dají se použít pro stanovení účinnosti ztuhňovacích mechanismů železničního svršku.

3.1.2 Metoda rozptylu záření gama

Při použití metody rozptylu záření gama je mezi zdrojem záření a detektorem stínící vrstva z těžkého materiálu, která brání přímému průchodu záření ze zářiče do detektoru. Detektor zaznamenává pouze záření, které bylo v materiálu rozptýleno převážně Comptonovým efektem. Touto metodou se měří objemová hmotnost materiálu v okolí detekční jednotky. Hodnověrnost naměřených objemových změn zkoumaných vrstev materiálu se však zmenšuje se vzrůstající vzdáleností od detekční jednotky. Pro proměřování materiálů o plošné hmotnosti $\rho_A = 150$ až $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ je výhodné používat zářič $\text{Co } 60$. Při plošné hmotnosti $\rho_A \leq 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ se používá zářič $\text{Cs } 137$. Podle geometrického uspořádání zářiče a detektoru rozeznáváme radiometrické soupravy hloubkové a povrchové.

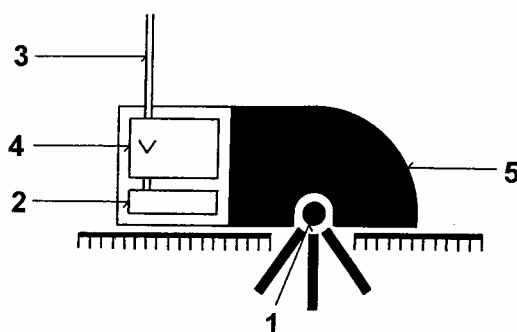


Obr. 3.3 Schéma radiometrické soupravy (ρ) hloubkové (1 – gamazářič, 2 – detektor, 3 – výstup k vyhodnocovací jednotce, 4 – předzesilovač, 5 – stínění mezi zářičem a detektorem, 6 – přepravní kryt gamazářiče)

a) Radiometrická souprava (ρ) hloubková

Radiometrická souprava hloubková (obr. 3.3) je uzpůsobena k měření uvnitř materiálu v kulové geometrii 4π . Vlastní detekční jednotka se skládá ze zdroje záření gama a detektoru, mezi kterými je umístěno stínící tělísko (nejčastěji je zhotovené z olova). Spouští se do předem osazených pažnic v materiálu. V soudržných materiálech je možné spouštět detekční jednotku i do vrtů bez pažnic. S vyhodnocovací jednotkou, která je stejně jako kryt zářiče umístěna na povrchu, je detekční jednotka spojena koaxiálním kabelem. Radiometrické soupravy hloubkové se používají především při průběžném měření objemové hmotnosti po výšce sypaných hrází a zemních těles. Hloubka měření je omezena únosností spojovacího kabelu průchodností sondy pažnicí a pohybuje se od 0,6 do 20 m.

b) Radiometrická souprava (ρ) povrchová

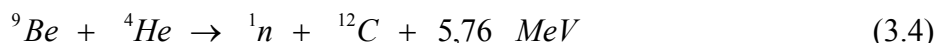


Obr.3.4 Schéma radiometrické soupravy (ρ) povrchové (1 – gamazářič, 2 – detektor, 3 – výstup k vyhodnocovací jednotce, 4 – předzesilovač, 5 – přepravní kryt gamazářiče)

na objemové hmotnosti materiálu a energii a aktivitě zářiče a dosahuje v průměru hodnoty 0,05 až 0,15 m. Radiometrické soupravy povrchové se s výhodou používají pro měření objemové hmotnosti asfaltových vrstev, vrstev zemin, při hutnění betonových konstrukcí vozovek a letištních ploch. aj.

3.2 Radiometrické zjišťování objemové vlhkosti (w)

Radiometrické měření objemové vlhkosti je založeno na principu moderace rychlých neutronů – převážně atomy vodíku. Z umělých radionuklidů nevysílá kromě kalifornia Cf 252 žádný izotop neutrony přímo. Je však řada jaderných procesů, při kterých se neutrony produkují nepřímo. Využívá se například reakce záření alfa s některými terčovými materiály, při které jsou emitovány rychlé neutrony. Nejčastěji používaným terčovým materiálem je berylium. Vznik neutronového záření je popsán rovnicí:



Jako zdroje záření alfa se běžně používá americium Am 241, méně často rádi-um Ra 226 a polonium Po 210. Emitované neutrony, které mají energii řádově v MeV, jsou zpomalovány pružnými srážkami s jádry atomů. Ztráta energie je závislá na hmotnosti jader a je největší u jader o rozměrech blízkých rozměrům neutronu, což jsou vodíková jádra – protony. Ve vlhkém prostředí jsou rychlé neutrony postupně zpomalovány pružnými srážkami s vodíkovými jádry až se dostanou do tepelné rovnováhy s ostatními jádry prostředí (při energii asi 0,025 eV) a jsou registrovány detektory pomalých neutronů. Pro detekci pomalých neutronů se používá několik typů detektorů. Jednak to jsou proporcionální trubice plněné BF₃ nebo He 3, dále pak scintilační detektory a GM trubice opláštěvané kadmíem Cd 113.

Objem materiálu potřebný k měření je funkcí vlhkosti. Čím je materiál vlhčí, tím menší objem ke zpomalení neutronů postačuje. Detektory pomalých neutronů jsou připojeny na vyhodnocovací jednotku, která výsledky měření zpracovává. Hodnota objemové vlhkosti se odečítá buď z kalibrační křivky na základě četnosti impulsů *n*, nebo je udána přímo na displeji v kilogramech na krychlový metr. Konstrukce radiometrické soupravy musí být volena tak, aby přesnost měření byla větší než $\pm 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Vzhledem k tomu, že moderace rychlých neutronů je způsobována atomy vodíku a nikoliv molekulami vody, může být měření vlhkosti zkresleno u materiálu, který obsahuje vázanou vodu (rašelina, uhlí aj.) Vliv na měření mohou mít i prvky, které pohlcují pomalé neutrony (např. Cl, K, B, Li, Hg, Cd, Br).

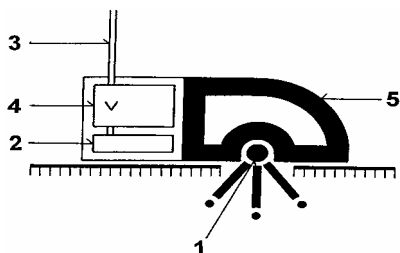
Podle geometrického uspořádání zářiče a detektoru rozlišujeme radiometrické soupravy hloubkové a povrchové. Toto uspořádání je obdobné jako u radiometrických souprav pro měření objemové hmotnosti. Z konstrukčního hlediska však mezi zářičem a detektorem není umístěno stínění, protože detektory jsou k rychlým neutronům necitlivé.

3.2.1 Radiometrická souprava (w) hloubková

Radiometrická souprava hloubková je uzpůsobena k měření uvnitř materiálu v kulové geometrii 4π . Detekční jednotka se skládá ze zdroje rychlých neutronů, za kterým následuje detektor pomalých neutronů. Spouští se do předem osazených pažnic v materiálu, nebo u soudržných materiálů pouze do vývrtů. Radiometrické soupravy hloubkové se používají pro měření objemové vlhkosti v sypaných hrázích a zemních tělesech po výšce v různých úrovních. Dá se jimi měřit i objemová vlhkost kameniva určeného pro betonárny.

3.2.2 Radiometrická souprava (w) povrchová

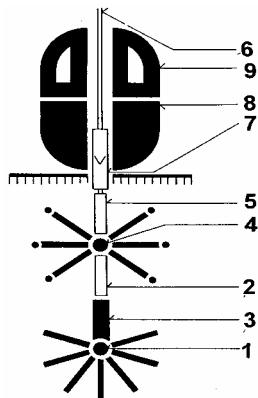
Radiometrické soupravy povrchové (obr. 3.6) se používají při měření objemové vlhkosti v polokulové geometrii 2π bez porušení materiálu. Polokulová geometrie umožňuje rychlým neutronům pronikat do materiálu, kde jsou moderovány. Zpomalené neutrony se rozptylem dostávají do detektorů. U moderních přístrojů je do detekční jednotky zabudována i vyhodnocovací jednotka. Radiometrické soupravy povrchové se používají především k měření vlhkosti povrchových vrstev betonu, zemin aj. Hloubkový dosah měření je nepřímo úměrná vlhkosti měřeného materiálu.



Obr. 3.6 Schéma radiometrické soupravy (w) povrchové (1 – neutronový zářič, 2 – detektor pomalých neutronů, 3 – výstup k vyhodnocovací jednotce, 4 – předzesilovač, 5 – přepravní kryt neutronového zářiče)

3.3 Kombinované radiometrické soupravy

V dnešní době se stále častěji dostává do popředí požadavek současného měření objemové hmotnosti a vlhkosti stavebních materiálů, aby se při jednom měření získalo více údajů o vlastnostech materiálu. (Kromě objemové hmotnosti a vlhkosti se dá určit i suchá objemová hmotnost, procento vlhkosti a míra zhutnění materiálu). Konstrukčně jsou kombinované radiometrické soupravy řešeny obdobně jako radiometrické soupravy povrchové a hloubkové. Obsahují zvlášť zdroj rychlých neutronů (nejčastěji Am + Be) a zářič gama (nejčastěji Cs 137). Detektor může být opět buď jeden (scintilační), kterým je možno rozlišit údaje od zpomalených neutronů a od záření gama, anebo dva – zvlášť pro každý druh záření.



Obr. 3.7 Kombinovaná radiometrická souprava hloubková (1 – gamazářič, 2 – detektor záření gama, 3 – stínění mezi zářičem a detektorem, 4 – neutronový zářič, 5 – detektor pomalých neutronů, 6 – výstup k vyhodnocovací jednotce, 7 – předzesilovač, 8 – přepravní kryt gamazářiče, 9 – přepravní kryt neutronového zářiče)

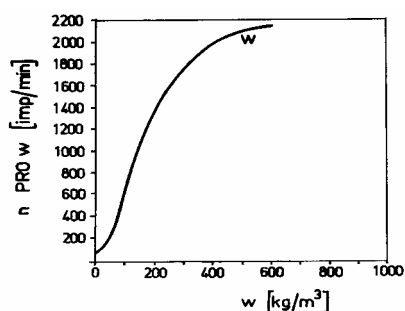
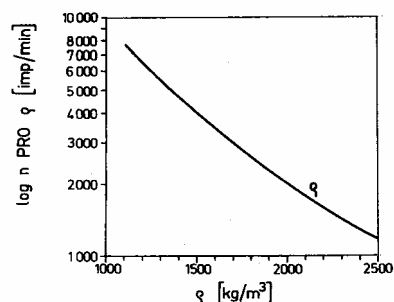
3.4 Kalibrace radiometrických souprav

Přesnost vyhodnocování radiometrického měření je ve velké míře závislá na sestavení kalibrační křivky. Kalibrační křivka vyjadřuje graficky závislost mezi četností impulsů udávanou detekční jednotkou a objemovou hmotností nebo vlhkostí materiálu. Obecně platí, že při rostoucí objemové hmotnosti materiálu

klesá četnost impulsů (zmenšuje se počet zaznamenaných fotonů záření gama a při rostoucí objemové vlhkosti roste i četnost impulsů (zvětšuje se počet zaznamenaných pomalých neutronů. Metoda a zkušební postup, při získávání hodnot pro kalibrační křivku musí být stejné, jak tomu bude při určování objemové hmotnosti, popř. objemové vlhkosti v praxi. Objemová hmotnost popř. objemová vlhkost materiálů používaných pro konstrukci kalibrační křivky se musí měnit v rozsahu, který přesahuje hodnoty objemové hmotnosti, popř. objemové vlhkosti zkoušených materiálů. Materiály používané pro kalibraci musí mít objemovou hmotnost, popř. objemovou vlhkost rovnoměrnou v celém objemu. K vytvoření kalibračního vztahu je třeba měření na nejméně sedmi vzorcích nezávislých, rozdílných, ale o známých objemových hmotnostech, popř. objemových vlhkostech.

Jednotlivé body kalibrační křivky lze získat v nádobách se zeminami, betonovou směsí nebo jiným sypkým materiálem, který se v průběhu kalibrace zhutňuje. Jiný způsob kalibrace pro objemovou hmotnost je zhotovení bloků buď z přirozeného homogenního materiálu o známé objemové hmotnosti a vlhkosti (žula, vápenec, pískovec), nebo pro objemovou vlhkost na blocích složených z vrstev materiálu s vysokým obsahem vodíku, prokládaných vrstvami hliníku. Používání bloků je výhodné, protože jsou trvalé a po vhodné povrchové úpravě tvoří stabilní reference objemové hmotnosti nebo objemové vlhkosti.

Obr. 3.9 Kalibrační křivka pro měření objemové hmotnosti (ρ - objemová hmotnost, n - naměřená četnost impulsů)



Obr. 3.10 Kalibrační křivka pro měření objemové vlhkosti (w - objemová vlhkost, n - naměřená četnost impulsů)

Kontrolní otázky:

1. Jaké zářiče se používají při radiometrickém měření objemové hmotnosti a vlhkosti?
2. Jaký je rozdíl v průběhu kalibračních křivek při měření objemové hmotnosti a objemové vlhkosti – co je příčinou?
3. Jaký je rozdíl mezi širokým a úzkým svazkem záření?
4. Jaká je přesnost radiometrického měření objemové hmotnosti a kolik impulsů je nutno pro dosažení této přesnosti načítat?
5. Co jsou kombinované radiometrické soupravy?



4 Radiografie ve stavebnictví



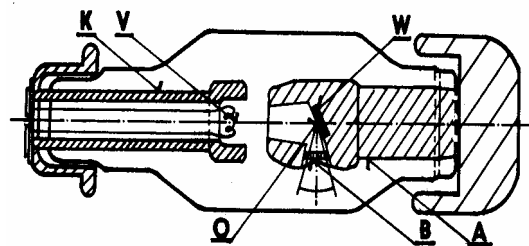
Radiografie se ve stavebnictví používá všude tam, kde je nutno stanovit vnitřní strukturu konstrukcí a materiálu bez porušení. U železobetonových konstrukcí se jedná především o stanovení průběhu a množství ocelové výztuže ve vybraných průřezích konstrukce, u konstrukcí z předpjatého betonu o stanovení průběhu, množství a kvality zainjektování předpínací výztuže. Radiografie rovněž umožňuje zjišťovat makrostrukturální defekty a vady konstrukcí.

4.1 Zdroje záření v radiografii

Radiografie se podle druhu a zdroje používaného záření nejčastěji dělí na rentgenografii a gamagrafii. K rentgenografii můžeme přiřadit i zdroje záření vysokých energií.

4.1.1 Rentgenografie

Zdrojem rentgenového záření jsou rentgenky. V nich nastává transformace kinetické energie elektronů, emitovaných katodou rentgenky, po dopadu na anodu na teplo a energii elektromagnetického záření. Emitované elektrony jsou urychlovány vysokým elektrickým potenciálem mezi katodou a anodou rentgenky. Aby nebyly elektrony ve své dráze směrem k anodě bržděny, jsou obě elektrody uloženy ve skleněné vakuové baňce (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Schéma dvou pólové rentgenky (K – katoda, V – vlákno katody, W – wolframová deska, O – ohnisko, A – měděný blok anody, B – beryliové okénko)

Katoda rentgenky - má jednu nebo dvě spirály, přesně umístěné v ocelové fokusační misce. Spirály bývají zhotoveny z wolframového drátu vysoké čistoty. Katodová spirála je žhavana, což vyvolává emisi termoelektronů do jejího okolí, kde je jimi vytvořen elektronový oblak. Elektronový oblak má záporný náboj, který brzdí další emisi elektronů z vlákna, nejsou-li z prostoru fokusační misky intenzívně odčerpávány anodou.

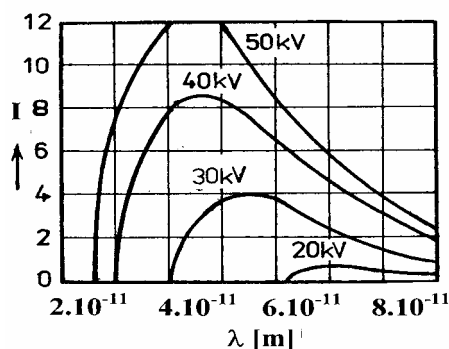
Proud na rentgence, vyjadřovaný miliampéry, lze do značné míry regulovat změnou žhavicího proudu vlákna, nikoli napětím. Zvýšením anodového napětí lze odčerpět větší část elektronů z prostoru fokusační misky, tímto způsobem velmi stoupá i proud rentgenky.

Anoda rentgenky - je wolframová deska, zalitá pod určitým úhlem do měděného bloku, v němž jsou umístěny chladicí kanály (Anoda rentgenky musí být velmi dobře chlazená, protože 99,0% příkonu se mění v teplo.). Na tomto úhlu závisí jednak velikost a tvar optického ohniska, jednak hustota toku záření svazku a úhel rozevření svazku. Záření vycházející z rentgenky prochází okénkem s beryliovým filtrem, které slouží k zachycení sekundárních elektronů.

Zmenšení hustoty toku záření při průchodu sklem baňky, okénkem a izolačním olejem nazýváme vlastní filtrací rentgenky.

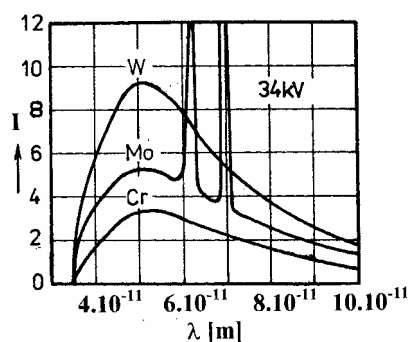
Rentgenové záření, které vychází z rentgenky, se skládá ze dvou v podstatě různých druhů:

a) Spojité spektrum záření - vzniká prudkým nárazem letících elektronů na anodu rentgenky a jejich pohybová energie se z největší části promění v teplo, pouze malá část se mění v rentgenové záření (1%). Toto záření je polychromatické, obsahuje spojitě všechny vlnové délky, počínaje určitou hodnotou λ_{\min} . danou maximálním napětím mezi anodou a katodou rentgenky až prakticky po viditelné světlo. Hustota toku záření a vlnová délka tohoto záření je závislá pouze na anodovém napětí rentgenky a nezávisí na kovu anodové destičky. Spojitého spektra záření se používá především k prozařování v technické praxi (makrostruktura) k účelům lékařským apod.



Obr. 4.2 Spojité rentgenové spektrum záření (λ - vlnová délka, I - hustota toku záření)

b) Charakteristické spektrum záření - se skládá z intenzivního záření zcela určitých vlnových délek, které je závislé na kovu anodové destičky. Jeho vlnová délka, protože nezávisí na velikosti anodového napětí, je přísně monochromatická. Hustota toku tohoto záření však roste se zvyšováním anodového napětí. Tohoto záření se používá ke studiu hmoty a jejího složení (mikrostruktura).



Obr. 4.3 Charakteristické rentgenové spektrum záření (λ - vlnová délka, I - hustota toku záření)

Technické rentgeny pro defektoskopii můžeme rozdělit:

a) podle konstrukce na:

- rentgenové přístroje s rentgenkou a napěťovými zdroji v jednom bloku (monobloku)
- rentgenové přístroje s rentgenkou oddělenou od napěťových zdrojů (nutno propojit vysokonapěťovým kabelem),

b) podle možnosti transportu přístroje:

- rentgenové přístroje stacionární,
- rentgenové přístroje mobilní,
- rentgenové přístroje přenosné.

Zdrojem vysokého napětí jsou transformátory i násobiče napětí, které také tvoří podstatnou součást rentgenových přístrojů. V současné době se vyrábějí transformátory pro provoz v evakuovaném oleji s vysokou elektrickou pevností nebo pro provoz v plynu. Regulace vysokého napětí se děje změnou primárního vstupního napětí buď regulačním transformátorem, nebo autotransformátorem.

Hmotnost rentgenových přístrojů monoblokového typu je vzhledem k velikosti vysokého napětí značná. Při použití nových materiálů a technologií je jejich hmotnost konstruktéry neustále snižována a dnes se pohybuje v rozmezí od 20 do 50 kg.

4.1.2 Zdroje ionizujících záření vysokých energií

Rozsah maximální energie záření u současné přístrojové techniky se ve světě pohybuje v rozmezí 1 až 30 MeV. Pro defektoskopickou kontrolu jsou určeny tyto typy urychlovačů:

- betatrony
- mikrotrony
- vysokofrekvenční lineární urychlovače

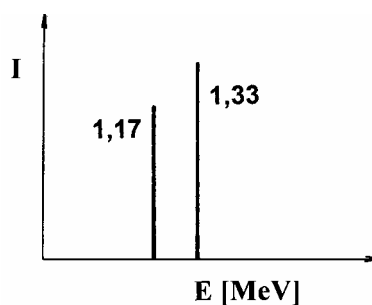
Zmíněná přístrojová technika je využívána především v hutnictví, těžkém strojírenství, v zařízeních jaderného a kosmického programu. Prozařovaná tloušťka oceli může dosahovat 500 mm. Začínají se však užívat i ve stavebnictví, kde umožňují prozařovat beton o tloušťce až 1500 mm. U urychlovačů se projevuje výhodnější přeměna elektrické energie v záření ve srovnání s rentgeny. Zatímco u rentgenu je to necelé 1%, u betatronu 6 MeV je to již 30% a u betatronu 20 MeV 65 %.

4.1.3 Gamagrafie

Radioaktivní záření je výsledkem specifických přeměn hmoty, známých pod názvem radioaktivita. Charakter tohoto záření je zcela určen prvkem, který je vysílá a není funkcí vnějších podmínek teploty, tlaku apod. Zdrojem radioaktivního záření je jádro atomu radioaktivního prvku.

a) Zářiče v gamagrafii

V gamagrafii se používají pouze složky záření gama radioaktivních izotopů. Složky beta a alfa jsou odfiltrvány. Z přirozených zářičů se dříve pro gamagrafii používalo radium z řady uranoradiové a mezotorium z řady toriové. V současné době se však používají převážně umělé radioizotopy. Na prozařování materiálů velkých tlouštěk se používají zářiče o velké energii záření gama jako je kobalt Co 60, iridium Ir 192 a cesium Cs 137. Na prozařování tenkých materiálů a materiálů s nízkou objemovou hmotností se používají zářiče s nižší energií



Obr. 4.4 Čárové spektrum gamazářiče (Co 60), (E – energie záření, I – hust. toku záření)

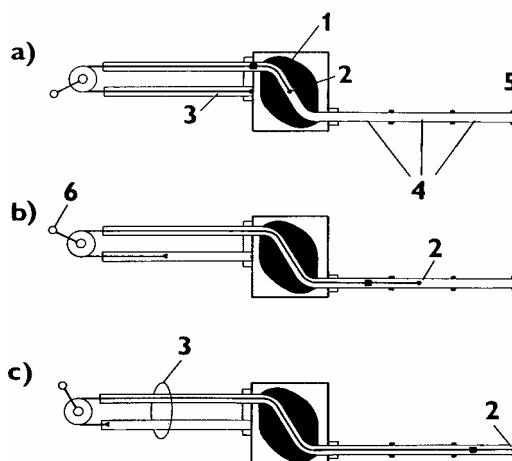
jako je a tulium Th 170 a ytterbium Yb 169. Na rozdíl od rentgenového záření je spektrum gamazáříčů čárové. Parametry záříčů jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Zdroje záření gama nejčastěji používané v radiografii:

radioizotopy	E [MeV]	$T_{1/2}$
Kobalt Co 60	1,25	5,3 roku
CesiumCs137	0,661	30 let
Iridium Ir 192	0,4	74 dní
Tulium Tm 170	0,084	129 dní
Ytterbium Yb 169	0,008 -0,308	32 dní

b) Stínící defektoskopické kryty záříčů

Záření emitované radioizotopy je škodlivé pro živé organizmy a nepříznivé mohou být i fyzikální jevy (ionizace), které záření vyvolává v okolí, a proto je nutno jak při přepravě tak při skladování radioizotopy ukládat do krytů, schopných bezpečně odstínit účinky záření. Záření α a β je při vnějším ozáření relativně málo nebezpečné a dá se snadno odstínit. Na odstínění záření α stačí list papíru a na odstínění záření β hliníková folie. Záříče emitující vysokoenergetické záření gama však musí být uloženy v krytech zhotovených z těžkých materiálů, schopných toto záření účinně absorbovat. Pro tento účel se dříve běžně používalo olovo o objemové hmotnosti $\rho = 11\,360\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V současné době se používají materiály s větší objemovou hmotností, jako je wolfram ($\rho = 19\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) nebo ochuzený uran - izotop U238 ($\rho = 19\,050\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Tloušťka stěn stínění závisí kromě materiálu na aktivitě a energii záření gama skladovaného záříče. Způsob vkládání a vyjímání záříče z krytu závisí na požadovaných aplikacích záříče a obvykle probíhá dálkovým ovládním. Bezpečnost je dále zvyšována vyloučením chybných výjezdů záříče tím, že přístroj může být otevřen a záříč může vyjet jedině při napojení jak ovládacího kabelu, tak výsuvné hadice. (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Mechanické dálkové ovládní defektoskopického krytu

- a) záříč v klidové poloze,
 b) záříč při vysouvání do pracovní polohy,
 c) záříč v pracovní poloze
 (1 – uranové stínění, 2 – gamazáříč, 3 – ovládací kabel, 4 – výsuvná hadice, 5 – koncovka výsuvné hadice, 6 – ruční ovládní)

Hmotnost uranových krytů pro záříče Co 60 o běžné aktivitě (300 GBq až 1 TBq) se pohybuje v rozsahu 100 až 150 kg, hmotnost uranových krytů pro Ir 192 o aktivitě 3,7 TBq se pohybuje kolem 15 kg.

4.2 Záznam obrazu na radiografický film

K registraci obrazu zkoušeného materiálu se v radiografii nejčastěji používají speciální radiografické filmy umístěné ve světlotěsné kazetě. Musí vynikat ostrou kresbou obrazu, vysokou citlivostí, širokým rozmezím použití a možností dokumentace.

4.2.1 Radiografický film

Citlivá vrstva radiografického filmu je připojena vrstvou pojidla na podložku z polyesteru (dříve z triacetátové celulózy). Na citlivou vrstvu (emulzi halogenidu stříbra, např. AgBr v želatině) je ještě nanášena ochranná želatinová vrstva. Pouze 1% záření procházejícího filmem reaguje s citlivou vrstvou a podílí se na vytváření latentního obrazu. Proto se používá s výhodou pro radiografii oboustranně polévaných filmů, čímž se dosáhne dvakrát vyššího zčernání.

Požadované vlastnosti na citlivé vrstvy jsou:

- jemnozrnnost
- vysoká citlivost
- strmá gradace
- nezávadnost materiálu
- trvanlivost

Zrnitost radiografických filmů lze vyjádřit numerickým číslem zrnitosti. Údaj zrnitosti je důležitý pro vyhodnocení vnitřní neostrosti rentgenového obrazu. Citlivost se udává pouze relativně a označuje se slovně. Nezávadnost materiálu předpokládá, že filmy neobsahují vady dané technologií výroby a trvanlivost závisí na kvalitě materiálu a způsobu uložení (filmy mají být uloženy v suchu, temnu, za teploty do 18°C v krabicích postavených na nejužší straně, neboť by se mohly tlakem chemicky narušit).

Formáty filmů pro radiografii jsou normalizovány - nejběžnější formát filmu při radiografické kontrole stavebních konstrukcí je však 300 mm x 400 mm.

4.2.2 Charakteristika radiografického filmu

Jednou z nejdůležitějších vlastností filmu je průhlednost, pro kterou byla definována **opacita o** jako poměr intenzity světla dopadajícího i_0 k intenzitě světla prošlého i .

$$o = \frac{i_0}{i} \quad (4.1)$$

Opacita nezávisí na intenzitě světelného zdroje.

Optická hustota D (zčernání) je definována jako logaritmus opacity

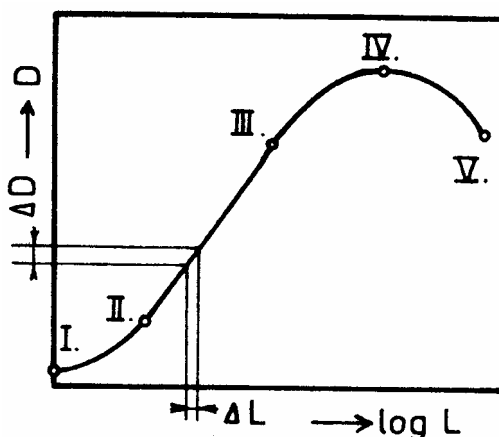
$$D = \log \frac{i_0}{i} \quad (4.2)$$

Tuto hodnotu lze výhodně měřit pomocí **fotometrů** nebo **denzitometrů**.

Závislost optické hustoty D na **ozařovací hodnotě L** je tak zvaná **charakteristická křivka** (charakteristika filmu). V praxi se zakresluje hodnota D na osu pořadnic, hodnota L v logaritmické stupnici na osu úseček (obr. 4.6).

V oblasti I-II přibývá zčernání filmu pomaleji než roste ozařovací hodnota (podexpozece).

Úsek II-III je oblast správné expozice, přírůstek zčernání D je úměrný přírůstku ozařovací hodnoty L . Úsek III-IV je oblast přeexpozice, zčernání přibývá opět pomaleji než hodnoty L . Část IV-V je oblast solarizace. Zčernání rostoucí s expozicí klesá a nastává inverze negativu v pozitiv.



Obr. 4.6 Charakteristika radiografického filmu (D - optická hustota (zčernání), L - ozařovací hodnota, I.-II. - oblast podexpozece, II.-III. - oblast správné expozice, III.-IV. - oblast přeexpozice, IV.-V. - oblast solarizace)

Charakteristiky filmu je možno využít k popisu některých veličin:

Gradace radiografického filmu - je dána strmostí charakteristické křivky v oblasti správné expozice. Na strmosti křivky závisí rovněž citlivost filmu.

Expoziční šíře - je interval mezi ozařovacími hodnotami okrajových bodů oboru správné expozice.

Objektivní kontrast - je rozdíl zčernání dvou sousedních míst radiogramu, změřený denzitometrem.

Subjektivní kontrast - je vjem, vyvolaný pozorováním zčernání dvou sousedních míst radiogramu.

4.2.3 Negativní vyvolávací proces

Interakce záření prošlého snímkaným objektivem s citlivou vrstvou radiografického filmu způsobuje vznik **latentního obrazu**. Úkolem negativního procesu je zviditelnění (vyvolání) tohoto obrazu a jeho fixace (ustálení). Negativní proces se skládá z vyvolání, mezipraní, ustálení, vypírání a sušení filmu.

Vyvolání je nejdůležitější součástí zhotovení negativu, na jeho provedení závisí jakost radiogramu. Pro použitý typ filmu je třeba volit vhodnou vývojku, teplotu a dobu vývoje, doporučené příslušnými výrobci radiografického materiálu. Účelem mezipraní je přerušit vyvolání a očistit film od zbytků vývojky. Ustálování je další důležitou složkou negativního procesu. Během ustálování se z citlivé vrstvy odstraní částice bromidu stříbrného, které jsou ještě citlivé, čímž je celý proces zčernání zastaven. Rovněž teplota a doba ustálování a složení ustalovače jsou důležité faktory, na nichž závisí kvalita radiogramu. Vypíráním, které se má provádět v proudící vodě, se odstraní ustalovač z filmu. Filmy je nutno sušit v bezprašném prostředí tak, aby nevznikly deformace filmu nebo citlivé vrstvy. Při sušení se filmy zavěšují do vyvolávacích rámečků a umísťují na speciální závěsy nebo do sušiček rentgenových filmů, které mají

regulovatelnou teplotu a filtrovaný vzduch. Uvedený stručný popis představuje klasickou metodu negativního procesu, prováděnou obvykle ručně.

Vyvolávací automaty

V posledních letech se stále častěji používají vyvolávací automaty na radiografické filmy. Jejich použitím se značně zkracuje proces zpracování filmu (z 50 minut při ručním vyvolávání na 7 až 14 minut).

Zkrácení vyvolávacího času je umožněno použitím speciálních chemikálií, které umožňují zpracovávat film při vyšších teplotách jednotlivých lázní. Výhodou automatického vyvolávání filmů není jen rychlost, ale i standardní kvalita negativů.

Vzhledem k tomu, že vyvolávací lázně časem stárnou, je vyvolávací automat ekonomický pouze na velkých defektoskopických pracovištích.

4.2.4 Zesilovací fólie

K zvýšení účinků rentgenového záření na citlivou vrstvu radiografického filmu se používá zesilovacích fólií. Umísťují se do kazety tak, že jsou těsně přiloženy z obou stran k filmu.

Ionizující záření, procházející pracovní vrstvou fólií, je částečně transformováno buď na viditelné světlo (fluorescenční fólie) nebo na fotoelektrony (kovové fólie), které mají vyšší fotochemickou účinnost a dovolují výrazné zkrácení expozice nebo zvětšení prozářitelnosti tloušťky stěny zkoušeného předmětu.

Různé typy radiografických filmů mají citlivou vrstvu uzpůsobenou buď pro práci bez fólií, pro práci s kovovými fóliemi, s fluorescenčními fóliemi a nebo fluorometalickými fóliemi.

a) Kovové zesilovací fólie

Zesilovací účinek kovových fólií je založen na fotoelektrickém jevu. Rentgenové záření dopadající na kovovou fólii, uděluje volným elektronům v kovových krystalech fólie energii potřebnou na překonání potenciálové bariery při povrchu kovu. Tyto elektrony mají vzhledem ke své energii malý dolet, proto musí být kovová fólie přiložena z obou stran k filmu těsně. Fotochemická účinnost elektronů je však vysoká a působí tedy na velké zčernání filmu.

Kovové fólie pracují jako filtry na sekundární rozptýlené sekundární záření. Z těchto důvodů a pro malý rozptyl je u kovových fólií v porovnání s fluorescenčními fóliemi ostrost kresby značně vyšší.

Nejčastěji používaným materiálem kovových fólií je olovo, cín nebo měď. Přední fólie bývá tenčí (0,1 až 0,2 mm Pb), zadní může být tlustší (0,15 až 0,2 mm Pb). Zesilovací faktor kovových fólií má hodnotu $V = 2$ až 3. Nejrozšířenější v technické radiografii jsou olověné zesilovací fólie.

b) Fluorescenční fólie

Rentgenové fluorescenční zesilovací fólie jsou tenké desky, obvykle stejných formátů jako filmy, které slouží k zesílení účinků rentgenového záření na radiografický film. Podstatnou částí fólie je vrstva luminoforu, nanesená na papírovou podložku nebo podložku z plastu, která má za úkol transformovat rentgenové záření (krátkovlnné elektromagnetické záření) na viditelné světlo

(dlouhovlnné elektromagnetické záření). Krystalky luminoforu jsou spojeny a nalepeny na podložku vhodným pojídkem (želatinou, arabskou gumou, nitrocelulózovým lakem, vodním sklem apod.), která nesmí měnit své vlastnosti s časem a vlivem dopadajícího záření. Z používaných luminoforů je nejvhodnější wolframán vápenatý (CaWO_4), na jehož záření (modrofialové světlo) jsou fotografické emulze nejcitlivější. Z jiných luminoforů se používají sirič zinečnatý (ZnS) nebo síran barnatý (BaSO_4) s přísadou síranu olovnatého (PbSO_4). Na ostrost kresby mají vliv jakost a velikost krystalů luminoforu, index lomu světla krystalu luminoforu a způsob uložení fólie v kazetě.

Zesilovací schopnost a ostrost kresby jsou veličiny nepřímo úměrné. To znamená, že ostrost kresby bude tím menší, čím více bude fólie obsahovat luminoforu nebo čím hrubší bude zrno luminoforu (zesilovací účinek však bude vyšší). Jak zesilovací schopnost, tak i ostrost kresby závisí na energii rentgenového záření, tj. na napětí na rentgence. Zesilovací schopnost roste s energií záření, ostrost kresby naopak klesá následkem většího rozptylu záření ve vyšetřovaném objektu i ve vlastních vrstvách fólie.

Důležitá je homogenita fluorescenční vrstvy co do její tloušťky a co do hustoty luminoforu. (Tloušťka fluorescenční vrstvy bývá 0,1 až 0,3 mm).

Fluorescenční zesilovací folie se vyrábí ve dvou provedeních :

- a) Ostře kreslicí zesilovací folie - důraz je kladen na jemnozrnnost - zesilovací faktor $V=30$ až 50.
- b) Vysoce zesilující folie - důraz je kladen na zesilovací účinek - zesilovací faktor $V= 60$ až 100.

c) Fluorometalická fólie

V poslední době se začínají stále častěji používat fluorometalické fólie, které slučují přednosti fluorescenčních a kovových fólií. Fluorometalické fólie se skládají z pružné podložky, na kterou je nanášena nejdříve tuhá olověná fólie, a pak vrstva luminoforů. Zesilovací faktor fólií závisí na energii záření, použitých filmech aj. a může nabývat hodnotu $V = 5$ až 150. V poslední době se objevily fólie s kovem homogenně rozptýleným v luminoforu.

4.2.5 Určení doby expozice pro radiografii

Pro volbu optimální doby expozice se používají tři alternativní postupy.

a) Určení expoziční doby z nomogramu

Expoziční nomogram lze použít pro rychlé orientační stanovení expoziční doby. Graficky se vyhodnotí závislost mezi okamžitou aktivitou zářiče (nebo vysokým napětím na rentgence), ohniskovou vzdáleností (vzdáleností film – zdroj záření), prozařovanou tloušťkou materiálu a pro konkrétní druh filmu a jeho zčernání vychází potřebná expoziční doba. Nevýhodou tohoto způsobu je, že neznáme přesně průběh zčernání filmu s rostoucí tloušťkou prozařovaného materiálu (roste vlivem centrální projekce z bodového zdroje záření).

b) Určení expoziční doby oceňovaným dozimetrem

Předem oceňovaný dozimetr lze využít analogicky jako dozimetr při fotografování. Detektor dozimetru se připevní ke konstrukci místo radiografického filmu a zjistí se expoziční příkon v tomto místě. Na stupnici dozimetru lze

přímo odečíst expoziční dobu pro zvolené zčernání konkrétního druhu filmu. Výhodou tohoto způsobu je, že nemusíme znát okamžitou aktivitu zářiče ani konkrétní geometrické uspořádání. Nevýhodou je neznalost průběhu zčernání po celé ploše filmu.

c) Výpočet expoziční doby pomocí programového kalkulátoru

Toto řešení je nejrychlejší, nejpřesnější a má největší vypovídací hodnotu. Veškeré parametry ovlivňující expoziční dobu lze zadat jako poměrné veličiny. Výsledkem je výpočet zčernání v libovolném bodu filmu.

4.2.6 Radiografické pomůcky

K pomůckám, které zajišťují zhotovení kvalitních radiogramů, patří především kazety (pokud nejsou filmy přímo v denním balení) a olověné značky a písmena.

a) Kazety

Kazety jsou v zásadě dodávány pružné, zhotovené buď z plastů popř. pryže nebo z kovu. Podle speciálních požadavků mohou být v provedení pro vlhké prostředí (vodotěsné) nebo mohou být uzpůsobeny k magnetickému upínání na ocelové předměty. Filmy se do kazet vkládají v temné komoře, a to mezi olověné, fluorescenční nebo fluorometalické fólie. Rostou požadavky na výrobu kompletovaných plastových kazet s vloženými olověnými fóliemi a filmem pro jedno použití. Práce s těmito kazetami je velmi rychlá, nevýhoda je vyšší cena.

b) Olověné značky a písmena

Pro přesné označení a orientaci radiogramů, kterou je nezbytné znát při vyhodnocování se používají různé typy olověných značek a písmen.

Olověná písmena se umísťují buď do průhledné plastové hmoty – (velikosti 4, 7.5, 10, 20 mm) nebo se odlévají samostatně (velikosti 4, 8, 10, 19 mm). Obvykle se dodávají v celých sadách. Písmena a číslice jsou doplněny celou řadou značek (šipky, kroužky, křížky), které mají usnadnit vyhodnocování radiogramů.

Kromě uvedených pomůcek jednotlivé firmy vyrábí různé doplňky, které mají usnadnit radiografickou kontrolu. Jsou to např. pásma, která obsahují olověná písmena, magnet. příchytky kazet, expoziční pravítka, speciální popisovače aj.

4.2.7 Jakost radiogramů

Jakost radiogramů je dána hodnotami dvou veličin, ostrostí a kontrastem. Na obě tyto veličiny působí mnoho dalších vlivů

a) Centrální promítání

Radiografický obraz prozařovaného objektu je v podstatě centrálním průmětem tohoto objektu buď na radiografický film, fluorescenční štít nebo stínítko atd. Středem promítání je ohnisko rentgenky, terč urychlovače nebo gamazářič.

Centrální promítání s nebodovým středem je znázorněno obecně na obr. 4.7. Je třeba si uvědomit, že každý bod zdroje záření se stává samostatným zdrojem záření a vysílá směrem k prozařovanému objektu svazek záření. Výsledkem takového promítání je, že každý zobrazovaný bod se promítá jako plocha,

přímo odečíst expoziční dobu pro zvolené zčernání konkrétního druhu filmu. Výhodou tohoto způsobu je, že nemusíme znát okamžitou aktivitu zářiče ani konkrétní geometrické uspořádání. Nevýhodou je neznalost průběhu zčernání po celé ploše filmu.

c) Výpočet expoziční doby pomocí programového kalkulátoru

Toto řešení je nejrychlejší, nejpresnější a má největší vypovídací hodnotu. Veškeré parametry ovlivňující expoziční dobu lze zadat jako poměrné veličiny. Výsledkem je výpočet zčernání v libovolném bodu filmu.

4.2.6 Radiografické pomůcky

K pomůckám, které zajišťují zhotovení kvalitních radiogramů, patří především kazety (pokud nejsou filmy přímo v denním balení) a olověné značky a písmena.

a) Kazety

Kazety jsou v zásadě dodávány pružné, zhotovené buď z plastů popř. pryže nebo z kovu. Podle speciálních požadavků mohou být v provedení pro vlhké prostředí (vodotěsné) nebo mohou být uzpůsobeny k magnetickému upínání na ocelové předměty. Filmy se do kazet vkládají v temné komoře, a to mezi olověné, fluorescenční nebo fluorometalické fólie. Rostou požadavky na výrobu kompletovaných plastových kazet s vloženými olověnými fóliemi a filmem pro jedno použití. Práce s těmito kazetami je velmi rychlá, nevýhoda je vyšší cena.

b) Olověné značky a písmena

Pro přesné označení a orientaci radiogramů, kterou je nezbytné znát při vyhodnocování se používají různé typy olověných značek a písmen.

Olověná písmena se umísťují buď do průhledné plastové hmoty – (velikosti 4, 7.5, 10, 20 mm) nebo se odlévají samostatně (velikosti 4, 8, 10, 19 mm). Obvykle se dodávají v celých sadách. Písmena a číslice jsou doplněny celou řadou značek (šipky, kroužky, křížky), které mají usnadnit vyhodnocování radiogramů.

Kromě uvedených pomůcek jednotlivé firmy vyrábí různé doplňky, které mají usnadnit radiografickou kontrolu. Jsou to např. pásma, která obsahují olověná písmena, magnet. příchytky kazet, expoziční pravítka, speciální popisovače aj.

4.2.7 Jakost radiogramů

Jakost radiogramů je dána hodnotami dvou veličin, ostrostí a kontrastem. Na obě tyto veličiny působí mnoho dalších vlivů

a) Centrální promítání

Radiografický obraz prozařovaného objektu je v podstatě centrálním průmětem tohoto objektu buď na radiografický film, fluorescenční štít nebo stínítko atd. Středem promítání je ohnisko rentgenky, terč urychlovače nebo gamazářič.

Centrální promítání s nebodovým středem je znázorněno obecně na obr. 4.7. Je třeba si uvědomit, že každý bod zdroje záření se stává samostatným zdrojem záření a vysílá směrem k prozařovanému objektu svazek záření. Výsledkem takového promítání je, že každý zobrazovaný bod se promítá jako plocha,

$$N_C = \sqrt[3]{N_G^3 + N_V^3 + N_R^3} \quad (4.4)$$

c) Kontrast



Kontrast v radiologii je definován jako rozdíl zčernání dvou sousedních míst na rentgenovém filmu

(rozdíl dvou sousedních jasů štítu). Je tvořen dvěma složkami: kontrastem záření a kontrastem fotografickým.

Kontrast záření K_Z - je poměr hustoty toku záření prošlého dvěma sousedními částmi prozařovaného objektu. Na hustotu toku záření procházejícího hmotou má vliv vlnová délka záření, atomové číslo a tloušťka prostředí. Prochází-li tedy hustota toku záření J_0 předmětem různých tlouštěk (d_1 a d_2), bude kontrast záření dán vztahem:

$$K_{Z_{1,2}} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{J_0 \cdot e^{-\mu \cdot d_1}}{J_0 \cdot e^{-\mu \cdot d_2}} = e^{\mu(d_2 - d_1)} \quad (4.5)$$

Kontrast záření pro dva různé sousední materiály o stejné tloušťce a stejné hustotě toku dopadajícího záření se vypočte dle rovnice:

$$K_{Z_{A,B}} = \frac{J_A}{J_B} = \frac{J_0 \cdot e^{-\mu_A \cdot d}}{J_0 \cdot e^{-\mu_B \cdot d}} = e^{(\mu_B - \mu_A) \cdot d} \quad (4.6)$$

kde A, B jsou materiály o různém atomovém čísle Z (mají různé μ_A a μ_B).

Kromě vlivu tloušťky a atomového čísla (hustoty) materiálu závisí kontrast záření na jevech interakce s hmotou, zejména na rozptylu a u energie záření nad 1,02 MeV na tvorbě párů elektron – pozitron.

Tyto nepříznivé vlivy lze však částečně potlačit filtrací záření, vycloněním primárního svazku a použitím vhodných masek.

Fotografický kontrast K_F - je dán vlastností radiografického filmu a průběhem negativního procesu.

Vlastnosti radiografických filmů jsou vyjádřeny jejich charakteristikou. V negativním procesu se na vytváření fotografického kontrastu podílí vývojka svou kvalitou a vhodností použití, doba a teplota vývoje.

d) Rozeznatelnost nejmenších detailů

Pro kontrolu betonových konstrukcí a konstrukcí z předpjatého betonu se užívá drátových a dutinových měrek dle ČSN 73 1376 "Radiografie betonových konstrukcí a dílců".

Rozeznatelnost R je možno numericky vyjádřit výrazem:

$$R = \frac{\phi}{d} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.7)$$

kde ϕ - je průměr nejmenšího drátku, který je na radiogramu vidět [mm],
 d - tloušťka prozařovaného materiálu [mm].

4.2.8 Vyhodnocování radiogramů

Vyhodnocování radiogramů (rentgenového a gama obrazu) nelze zatím plně objektivizovat, stále záleží do značné míry na zkušenostech, sensorických schopnostech a okamžité kondici vyhodnocujícího pracovníka.

Vyhodnocování radiogramů na **negatoskopu** se řídí články 58 až 61 ČSN 01 5010 „Zjišťování vad materiálů prozařováním. Základní ustanovení.“ K vyhodnocování je nezbytná tmavá místnost s bezpečnostním červeným osvětlením pracovního prostoru. K prosvícení radiogramů se používá negatoskopu. V principu se jedná o skříň, ve které je umístěna jedna nebo více zpravidla halogenových žárovek, které osvětlují matnici. Napětí přiváděné na žárovky lze regulovat, a tím lze měnit i jas matnice. S vyšším jasnem matnice souvisí úzce možnost vyhodnocovat radiogramy o vyšším zčernání. Lze tedy maximální jas matnice považovat za jedno z rozhodujících hledisek při výběru negatoskopu. Je užitečné, je-li ovládání jasu možné nožním ovládáním, aby ruce zůstaly volné pro manipulaci s radiogramem. Důležitým příslušenstvím negatoskopů jsou clony, které se vkládají na matnici a vymezují tak užitečnou plochu pro vyhodnocování radiogramů různých formátů. Při výměně radiogramů musí jas matnice podstatně poklesnout, aby obsluha nebyla oslňována (ovládání pedálem).

K odstranění možných chyb při subjektivním vyhodnocování lze přispět objektivizací pomocí televizního řetězce a digitalizace, tím, že se obraz převede na množinu čísel, kterou lze zpracovat matematicky na PC. Přejít mezi subjektivním a objektivním vyhodnocováním tvoří úprava obrazu elektronickou cestou tak, aby pozorovatel měl vytvořeny optimální podmínky pro vyhodnocování. Jde zejména o úpravu kontrastu, vytvoření izohélií (křivek stejného zčernání) a vybarvení nepravými barvami (podle zčernání), popř. spojení všech možností (navíc s elektronickou a izohelickou lupou) v přístroji pracujícím v reálném čase.

4.3 Radiografická kontrola uložení výztuže

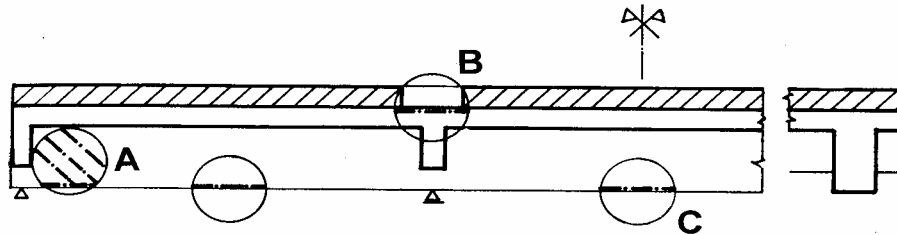
4.3.1 Volba míst radiografické kontroly

Zkušební místa určuje obvykle statik, který provádí statický přepočít konstrukce a svůj požadavek konzultuje s pracovníky zkušební organizace.

Výztuž se kontroluje v místech, kde na konstrukci působí největší ohybové momenty nebo posouvající síly. U prostých trémových konstrukcích se proto kontroluje pouze dolní tahová výztuž uprostřed rozpětí a smyková výztuž u podpory. U spojitých trémových konstrukcích se mimoto ještě zjišťuje horní tahová výztuž nad podporou.

U deskových konstrukcích se opět zjišťuje dolní tahová výztuž uprostřed rozpětí a na základě úbytku dolní tahové výztuže u podpory se usuzuje na množství smykové výztuže. U spojitých deskových konstrukcích se kontroluje také horní tahová výztuž nad podporou.

U spřažených konstrukcí se zpravidla kontroluje pouze výztuž v železobetonové desce a ověřují se spřahovací prvky.



Obr. 4.8 Volba míst radiografické kontroly (A - smykový výztuž, B - výztuž nad podporou, C- výztuž uprostřed rozpětí trámu)

4.3.2 Volba zdroje záření

Ve většině případů se při radiografické kontrole železobetonových konstrukcí používá jako zdroje záření gamazářič kobalt Co 60, který je umístěn v defektoskopickém krytu.

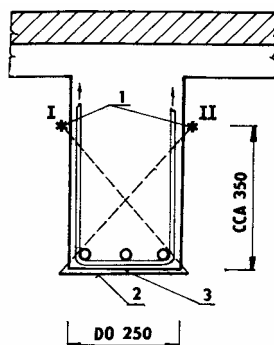
Pouze při snímkování, kdy je požadována vysoká kvalita radiogramů (velký kontrast), je výhodné použít rentgeny. Kruhové či lineární urychlovače se používají v případech, kdy je nutno prozařovat betonové konstrukce o velké tloušťce. Protože urychlovače mají poměrně úzký užitečný svazek záření, je nutno při snímkování volit velkou ohniskovou vzdálenost, čímž se však prodlužuje doba expozice.

4.3.3 Geometrie prozařování

Podle typu prozařované konstrukce je nutno volit ohnisko pro umístění zářiče a místo pro umístění radiografického filmu tak, aby film byl exponován pokud možno rovnoměrně a aby nedocházelo k jeho podexponování nebo přeexponování.

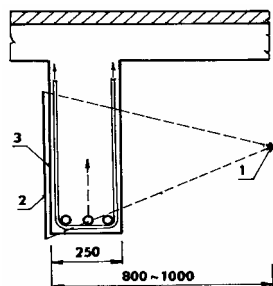
a) Trámová konstrukce

U trámových konstrukcí se přesné uložení a profil výztuže stanoví stereoskopickým snímkováním kontrolovaných průřezů postupně ze dvou ohnisek (obr. 2.31), vzájemně vzdálených přibližně 200mm. Při větších šířkách kontrolovaných trámů (nad 250 mm) se zářič umístí do vrtů uvnitř trámu (obr. 2.32) tak, aby jejich vzdálenost byla cca 200 mm. Takto se dají kontrolovat trámy do šířky 500 mm i více.



Obr. 4.9 Snímkování trámu do šířky 250 mm – zářič je umístěn na povrchu konstrukce (I- ohnisko zářiče I.,(II.), 2 – radiografický film I.,(II.), 3 – olověná fixační značka)

Smyková výztuž u podpory se zjišťuje bočním prozářením trámu při ohniskové vzdálenosti alespoň 800mm. Při kontrole smykové výztuže se stereoskopická metoda nepoužívá, protože profil výztuže je již znám ze snímkování střední části trámu.



Obr. 4.10 Snímkování trámu nad 250 mm – zářič umístěn do vývrtu uvnitř trámu (1-ohnisko zářiče I.,(II.), 2 – radiografický film I.,(II.), 3 – olověná fixační značka)

b) Desková konstrukce

U železobetonových stropních desek o tloušťce 100 až 200 mm postupujeme tak, že podlahu na desce odstraníme alespoň v obdélníku 800 x 600 mm. Na tuto plochu, označenou olověnými značkami rozmístíme čtyři radiografické filmy v kazetách. Pod deskou umístíme ohnisko zářiče tak, aby bylo ve vzdálenosti 800 mm od filmu. Pro přesné stanovení výztuže v desce používáme opět stereoskopickou metodu. Po zhotovení základního snímku posuneme zářič alespoň o 200 mm a při ponechaných olověných značkách pořídíme druhý snímek na vyměněnou čtveřici filmů.

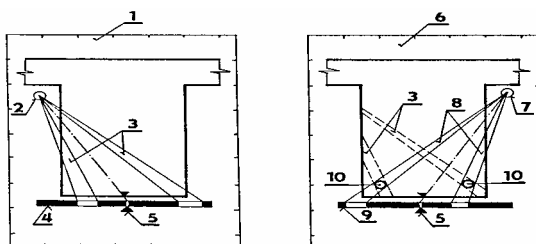
U železobetonových desek tlustých 300 až 350 mm lze výztuž snímkovat přiložením radiografických filmů na líc desky, přičemž zářič je umístěn na povrchu konstrukce. Výztuž se kontroluje stereoskopicky tak, že zářič se při snímkování přesouvá ve 200 mm krocích ve směru kolmém na směr hlavní výztuže. Pro stanovení rozložení výztuže stačí zpravidla 3 snímky.

Při větších tloušťkách deskových konstrukcí se zářič umísťuje do otvorů vyvrtaných do líce konstrukce ze stejné strany jak jsou umístěny filmy.

4.3.4 Vyhodnocení radiografických zkoušek

Při vyhodnocení radiogramů je nutné přihlížet ke zkreslení, které vyplývá z centrální projekce při zhotovení snímků prozařováním ze zdroje o velmi malém rozměru na dvourozměrný filmový materiál. Na základě získaného plošného záznamu je třeba provést zpětný proces jeho převedení do prostorné představy. Přitom je nutné vycházet z údajů o technickém provedení snímků a o známém materiálovém složení prozařovaného předmětu.

Nejčastěji se rozložení výztuže v průřezu zjišťuje graficky vynesáním geometrie, při které byl profil snímkován, na papír. U menších průřezů se volí měřítko 1 : 1, u větších průřezů se volí měřítko 1 : 2. Na vynesném profilu se vyznačí fixační bod a od něj se začnou na obě strany vynášet stopy výztuže, zjištěné z radiografických filmů. Vynesné stopy výztuže se pospojují s ohnisky a na průsečících přísl. spojnic dostáváme polohu a profil kontrol. Výztuže.



Obr. 4.13 Postup při vyhodnocování radiogramů (1 – první středová projekce, 2 – první ohnisko středového promítání, 3 – první středový průmět výztuže na obrys trámu, 4 – první radiogram, 5 – průmět fixační značky, 6 – druhá středová projekce, 7 – druhé ohnisko středového promítání, 8 – druhý středový průmět výztuže na obrys trámu, 9 – druhý radiogram, 10 – vyhodnocená poloha výztuže

Kontrolní otázky:



1. *Jaké zdroje záření se používají v radiografii?*
2. *Jaký je princip vzniku rentgenového záření?*
3. *Jaký je postup při vyvolávání exponovaných radiogramů?*
4. *Co jsou zesilovací folie?*
5. *Jak probíhá radiografická kontrola výztuže v železobetonovém trámu?*

5 Zdravotní zatížení obyvatelstva zářením

5.1 Přírodní pozadí

Život na Zemi vznikl a vyvíjí se v podmínkách stálého působení přirozeného radioaktivního pozadí. Toto pozadí je vytvářeno více nebo méně pronikavým zářením, které působilo již v procesu vzniku živých organismů a člověka na Zemi rovnoměrně, takže u žádného živého organismu nedošlo k vyvinutí speciálního čidla, které by reagovalo na zvýšenou úroveň ionizujícího záření varovným způsobem a k vytvoření odpovídajících adaptačních mechanismů, jimiž by se organismus mohl změnám úrovně radioaktivity pozadí přizpůsobit.



Přírodní pozadí radioaktivního záření na Zemi je způsobeno následujícími zdroji:

- a) **Terestrické záření** - převážně záření gama, které vychází z hornin podloží. Jeho dávkový příkon přímo závisí na horninách podloží (na granitovém podloží je trojnásobný dávkový příkon ve srovnání s křídovým podložím). V naší zemi je průměrná hodnota příkonu dávkového ekvivalentu na žulových masivech 1 mSv/rok.
- b) **Kosmické záření** - vysokoenergetické záření, které na Zemi proniká z kosmu i když je zeslabováno atmosférou. Nejnižší hodnota dávkového příkonu je u hladiny moře cca 0,8 mSv/rok, zatímco ve výšce 4,5 km je tato hodnota již 10x větší.
- c) **Rozpadové produkty radonu** - patří k nejvýznamnějším zdrojům, které způsobují vnitřní ozáření plíc zářením alfa. Toto záření představuje většinu všech dávek, jimiž jsou lidé vystaveni a činí v průměru 2,4 mSv/rok.

Přírodní radioaktivní pozadí, které je rozhodující složkou zátěže obyvatelstva, se dá ovlivnit jen částečně. Zcela neovlivnitelné je kosmické záření, protože je z největší části produkováno při slunečních erupcích jako vysokoenergetické elektromagnetické vlnění a tok protonů nebo neutronů, nebo je tvořeno těžkými nabitými částicemi ze vzdáleného vesmíru.

Neovlivnitelné je také terestrické záření, které způsobují přírodní radionuklidy obsažené v půdě, horninách, vodě a v přízemních vrstvách atmosféry. Největší měrou se na něm podílejí přírodní radioaktivní prvky uranové a thoriové přeměnové řady (viz kap. 2.1.2.1) a dále radioaktivní draslík K 40. Tyto prvky jsou nebezpečné v tom, že způsobují vnitřní ozáření živých organismů.

Mezi přírodní zdroje záření patří též radon a jeho dceřiné produkty. Účinky radonu na obyvatelstvo lze však na rozdíl od kosmického záření a záření terestrického ovlivňovat.

5.2 Biologické účinky záření

Výzkum v oblasti biologických účinků záření není zdaleka ukončen a dosažené výsledky nejsou vždy jednoznačné. Různé změny, vyvolané ionizujícím zářením u člověka, nemají stejný dosah pro jeho zdravotní stav, pracovní schopnost, délku života nebo schopnost reprodukce. Tím spíše systém radiační ochrany vyžaduje vypracování jednoznačných kritérií, zaměřených na prevenci důsledků ozáření.

Obecně se vztah dávky ionizujícího záření a vyvolaných biologických účinků dá charakterizovat ze dvou hledisek:

a) Nestochastické účinky -

jsou účinky, k nimž dochází v důsledku smrti části ozářené buněčné populace. Závažnost těchto účinků vzrůstá s dávkou od určitého dávkového prahu (pod ním se účinek neprojeví) a mají charakteristický klinický obraz. Do této skupiny patří například akutní nemoc z ozáření nebo radiační zánět kůže. Vzhledem k tomu, že tyto účinky jsou charakteristické existencí dávkového prahu, jsou někdy označovány jako účinky **deterministické**.

b) Stochastické účinky-

jsou to účinky vyvolané mutacemi (změnami v genetické informaci buňky) a předpokládá se pro ně bezprahový, lineární vztah mezi dávkou a účinkem. Závislost těchto účinků na dávce má statistický charakter, a proto pro ně bylo zavedeno označení účinky stochastické (pravděpodobné, náhodné). Velikost dávky záření se proto nemusí projevit u jednotlivce z populace, ale v celé populaci mění četnost nárůstu zhoubných novotvarů a dědičné poškození. S rostoucím dávkovým ekvivalentem tedy vzrůstá pro jednotlivce pravděpodobnost poškození. Klinický obraz těchto účinků není typický, neodlišuje se od „spontánně“ vzniklých případů.

5.3 Principy ochrany před ozářením

Cílem ochrany před ozářením pracovníků radiační defektoskopie je zcela vyloučit nežádoucí nestochastické účinky a omezit výskyt stochastických účinků na tak nízkou úroveň, aby byla přijatelná jak pro společnost, tak pro jednotlivce.

Nestochastickým účinkům lze zabránit stanovením tak nízkých limitů dávkového ekvivalentu, aby nebyla dosažena prahová dávka ani po celoživotním ozáření. Omezení stochastických účinků se zajišťuje systémem limitovaných dávek tak, aby pravděpodobnost poškození záření byla snížena na velmi malou míru a aby přitom nedocházelo k nežádoucímu omezení využití zdrojů záření. Základem systému limitování dávek je uplatňování následujících zásad:

- činnost způsobující ozáření musí být zdůvodněna přínosem pro společnost (princip zdůvodnění)
- ozáření osob musí být tak nízké, jak lze z hledisek ekonomických a společenských dosáhnout (princip optimalizace)
- dávkový ekvivalent žádného jednotlivce nesmí přesáhnout limity doporučené pro příslušné podmínky (princip nepřekročení limitů).

5.4 Atomový zákon

Od 1.července 1997 vstoupil v platnost **zákon 18/1997 Sb. o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon)** a o změně a doplnění některých zákonů. K tomuto zákonu byla v průběhu roku 1997 vydána řada vyhlášek, které jednotlivé paragrafy „atomového zákona“, dále upřesňují. Otázkami „limitů“ se zabývala **vyhláška 184/97 Sb. o požadavcích na zajištění radiační ochrany**, která byla v roce 2002 nahrazena **vyhláškou 307/02 o radiační ochraně**.

V § 19 této nové vyhlášky jsou uvažovány hodnoty, které jsou nazvány **Obecné limity**, které se týkají **obyvatelstva** (1mSv/rok), v § 20 pak **Limity pro radiační pracovníky**, které činí v průměru 20 mSv/rok (ve vyhlášce je sledovaný interval 5 let). S těmito hodnotami však nelze uvažovat např. ve výpočtech stínění, neboť dle § 4 odst. 6 atomového zákona (AZ) se jedná o součet možných kombinací ozáření, který nesmí být překročen. AZ v § 4 odst. 4 zavádí pojem **směrná hodnota**, což je hodnota ozáření, která je tak nízká, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek. Vyhláška 307/02 Sb. v § 17 odst. 4 uvažuje se směrnou hodnotou 1 Sv pro roční kolektivní efektivní dávku, 1 mSv pro roční efektivní dávku u radiačních pracovníků a 50 µSv pro roční efektivní dávku u ostatních osob.

Poznámka

- kolektivní efektivní dávka - je součet efektivních dávek všech jednotlivců v určité skupině



Rozumně dosažitelná úroveň radiační ochrany se považuje za dostatečně prokázanou, pokud ani za předvídatelných odchylek od běžného provozu nemůže být žádná z uvedených směrných hodnot překročena, a to ani u jedné osoby.

Základní limity a směrné hodnoty se vztahují na souhrn ozáření ze všech činností a zdrojů s výjimkou ozáření pacienta při lékařských výkonech a ozáření z přirozeného pozadí. Ozáření při lékařských výkonech musí být zdůvodněno očekávaným zdravotním prospěchem a ochrana osob prováděna tak, aby ozáření pacienta bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout. Ozáření obyvatelstva přírodními zdroji podléhá usměrnění v podmínkách, kdy se lidskou činností může měnit, a kdy je možné je omezit vhodnými opatřeními.

Kontrolní otázky:

1. Čím je tvořeno přírodní radioaktivní pozadí?
2. Jaké jsou biologické účinky záření?
3. Jaké jsou základní principy ochrany před ozářením?



6 Autotest



1. Jaké druhy ionizujícího záření znáte?
2. K jakým jevům (interakcím) dochází při průchodu záření gama látkou?
3. K jakým jevům (interakcím) dochází při průchodu neutronů látkou?
4. K čemu dochází při radiačním záchytu neutronů?
5. Jaký je rozdíl mezi dávkou D a dávkovým ekvivalentem H?
6. Jaký je princip scintilačního detektoru?
7. Na jakém principu je založeno radiometrické měření objemové hmotnosti (ρ) a jaké zářiče se pro toto měření používají?
8. Na jakém principu je založeno radiometrické měření objemové vlhkosti (w) a jaké zářiče se pro toto měření používají?
9. Co je latentní obraz?
10. Čím je způsoben zesilující účinek kovových zesilovacích folií?

7 Závěr

Historie objevu a využití ionizujícího záření a jaderné energie přesahuje jen nepatrně hranici 100 let. Z hlediska vývoje lidské civilizace je to historie krátká, neboť jiné vědní obory – např. metalurgie je stará jak lidstvo samo. Avšak i za tuto krátkou dobu si tento obor našel četné zastánce a odpůrce. Na využívání jaderné energie je odkázána energetika mnoha průmyslově vyspělých zemí a zřejmě s poklesem zásob fosilních paliv její význam bude dále stoupat. Ionizující záření je využíváno v lékařství při diagnostice i terapii a při nedestruktivní kontrole materiálu ve strojírenství a stavebnictví. Pro mnohé „odborníky“ a „hnutí“ je však jaderná energie symbolem nebezpečí a zkázy a vynakládají nemalé úsilí na její potlačení, omezení a dokonce zakázání. Právě na jadernou energii platí výstižné přirovnání, že je „dobrý služebník, ale zlý pán“. Jaderné havárie (havárie v Černobyli) se dostávají do povědomí lidí daleko hlouběji, nežli ostatní havárie a pohromy, ať již přírodní katastrofy (zemětřesení, záplavy, epidemie aj.) anebo vyplývající z lidské činnosti, jako jsou havárie dopravních prostředků (letadla, vlaky, lodě), poruchy inženýrských staveb (mosty, přehrady, budovy) a v neposlední řadě i války, které jsou průvodním jevem všech etap vývoje lidské společnosti.

7.1 Shrnutí



Učební text, který jste prostudovali, obsahuje základní informace o účincích ionizujícího záření a jsou uvedeny jeho aplikace při nedestruktivním zkoušení stavebních materiálů - v radiometrii (zjišťování objemové hmotnosti a vlhkosti stavebních materiálů) a radiografii (stanovení vnitřní struktury stavebních materiálů). Závěrem učebních textů jsou uvedeny i biologické účinky ionizujícího záření a legislativní opatření, platná v současnosti.

7.2 Klíč k autotestu

1. Známe záření alfa (α), záření beta (β), záření gama (γ) a neutronové záření
2. Při průchodu záření gama látkou dochází k fotoefektu, Comptonovu rozptylu a k tvorbě dvojic – elektron + pozitron.
3. Při průchodu neutronového záření látkou dochází k pružnému rozptylu, nepružnému rozptylu a radiačnímu záchytu neutronů.
4. Při radiačním záchytu neutronů dochází k vytvoření umělého radioizotopu.
5. Dávka D je veličinou, která charakterizuje absorpci energie v daném elementárním objemu látky. Dávkový ekvivalent H je veličina, která charakterizuje významnější škodlivé účinky ozáření některými druhy záření na zdraví. Je definován jako součin dávky D v uvažovaném bodě tkáně, jakostního činitele Q v tomto bodě a popřípadě též součinu ostatních modifikujících činitelů N

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

(v současné době se uvažuje $N = 1$).

6. Scintilační detektory jsou založeny na vlastnostech některých organických i neorganických látek, které dopadající ionizující záření přeměňují na dlouhovlnné fotony viditelného světla, které jsou registrovány fotonásobičem.
7. Radiometrické měření objemové hmotnosti je založena na principu průchodu a zeslabení záření gama a na principu rozptylu záření gama v měřeném materiálu. Jako zdroje záření gama se nejčastěji používá cesium Cs 137 a kobalt Co 60.
8. Radiometrické měření objemové vlhkosti je založeno na principu moderace rychlých neutronů na atomech vodíku. Z umělých radionuklidů nevysílá kromě kalifornia Cf 252 žádný izotop neutrony přímo. Je však řada jaderných procesů, při kterých se neutrony produkují nepřímo. Využívá se například reakce záření alfa s některými terčovými materiály, při které jsou emitovány rychlé neutrony. Nejčastěji používaným terčovým materiálem je berylium Be. Jako zdroje záření alfa se běžně používá americium Am 241, méně často rádium Ra 226 a polonium Po 210.
9. Latentní obraz vzniká při interakci záření prošlého snímkováním objektivem s citlivou vrstvou radiografického filmu. Úkolem negativního procesu je zviditelnění (vyvolání) tohoto obrazu a jeho fixace (ustálení). Negativní proces se skládá z vyvolání, mezipraní, ustálení a vypírání.
10. Zesilovací účinek kovových fólií je založen na fotoelektrickém jevu. Rentgenové záření dopadající na kovovou fólii, uděluje volným elektronům v kovových krystalech fólie energii potřebnou na překonání potenciálové bariery při povrchu kovu. Tyto elektrony mají vzhledem ke své energii malý dolet, proto musí být kovová fólie přiložena z obou stran k filmu těsně. Fotochemická účinnost elektronů je však vysoká a působí tedy na velké zčernání filmu.



8 Seznam použité literatury



- [1] Hönig, A.; Zapletal, V.: Nedeštruktivní zkušebnictví, Skripta VUT v Brně, 1982
- [2] Horák, Z.; Krupka, F.: Fyzika. Celostátní učebnice, Praha, SNTL/SVTL, 1966
- [3] Faires, R. A; Boswell, G. G. J.: Radioisotope Laboratory Techniques, London, Butterwoths, 1981
- [4] Šeda, J a kolektiv: Dozimetrie ionizujícího záření. Celostátní učebnice, Praha, SNTL, 1983
- [5] ČSN 01 1308 Veličiny a jednotky v atomové a jaderné fyzice, 1987
- [6] Šeda, J. a kolektiv: Jaderná elektronika, Praha, SNTL, 1977
- [7] Dozimetrické vyhodnocení radiační havarijní situace (Metodiky a postup). Praha, ISPSP, 1981
- [8] ČSN 73 1375 Radiometrické zkoušení objemové hmotnosti a vlhkosti, 1973
- [9] ČSN 73 1376 Radiografie betonových konstrukcí a dílců, 1978
- [10] Míšek, B.; Ptáček, L.: Zkoušení materiálů a výrobků bez porušení. Praha, SNTL, 1973
- [11] Hobst, L.: Betatronografie betonových konstrukcí. Kandidátská disertační práce na ÚSRD VUT v Brně, 1977
- [12] Keck, Ch.: Urychlovače částic. Praha, SNTL, 1965
- [13] Hobst, L.: Nedeštruktivní zkoušení železobetonových a předpjatých silničních mostních konstrukcí. Výzkumná zpráva, Brno, ÚSRD VUT v Brně, 1984
- [14] Svoboda, R.: Program na výpočet expoziční doby při prozařování konstrukcí a materiálů zářením gama izotopu Co60. Sborník přednášek "Nedeštruktivne metody zkúšania v stavebníctve 83", Dom techniky ČSVTS Košice 1983
- [15] Hobst, L.; Vítek, L.: Využití radiografie při diagnostice železobetonových konstrukcí. Sborník symposia "Sanace betonových konstrukcí a podlah", Brno, 1993