

Lucie Súkupová

Radiační ochrana při rentgenových výkonech

– to nejdůležitější pro praxi



Poděkování

Poděkování patří hlavně Edvardu Vajglovi za skvělé obrázky, nad nimiž strávil desítky hodin, a Filipovi Jírů za prvotní nápad napsat knihu. Děkuji také prof. MUDr. Janu Peregrinovi, CSc., a jeho Pracovišti radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM za vstřícný přístup. A dále děkuji čtyřem odborným společnostem, konkrétně Radiologické společnosti ČLS JEP, České společnosti fyziků v medicíně, z. s., České společnosti intervenční radiologie ČLS JEP – Nadaci prof. Rösche a Společnosti radiologických asistentů České republiky, z. s., bez jejichž finanční podpory byste teď knihu nedrželi v ruce. Velmi děkuji také svým rodičům za jejich neutuchající podporu v tom, co dělám.

autorka, 2. 1. 2018

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována ani šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

Ing. Lucie Súkupová, Ph.D., EACMPE

Radiační ochrana při rentgenových výkonech – to nejdůležitější pro praxi

Autorka:

Ing. Lucie Súkupová, Ph.D., EACMPE

Recenze:

Mgr. Ondřej Krahula, MBA

MUDr. Ing. Iva Krulová

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2018

© Lucie Súkupová, 2018

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2018

Foto na obálku dodala autorka.

Obrázky v knize pocházejí z archivu autorky, není-li uvedeno jinak.

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 6887. publikaci

Odpovědný redaktor Mgr. Marek Chvátal

Sazba a zlom Antonín Plicka

Počet stran 280

1. vydání, Praha 2018

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v této knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění ale nevyplývají pro autory ani pro nakladatelství žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-247-2842-1 (pdf)

ISBN 978-80-271-0709-4 (print)

Knih vznikla za významné podpory těchto odborných společností a spolků:

- **Radiologická společnost
České lékařské společnosti J. E. Purkyně**
- **Česká společnost fyziků v medicíně, z.s.**
- **Česká společnost intervenční radiologie
České lékařské společnosti J. E. Purkyně –
Nadace prof. Rösche**
- **Společnost radiologických asistentů
České republiky, z.s.**



www.crs.cz



ČSFM

ČESKÁ SPOLEČNOST FYZIKŮ V MEDICÍNĚ, Z.S.

www.csfm.cz

**Česká společnost
intervenční radiologie
České lékařské společnosti
J. E. Purkyně – Nadace prof. Rösche**

www.csir.cz



SRLA
SPOLEČNOST
RADIOLOGICKÝCH
ASISTENTŮ ČR

SPOLEČNOST RADIOLOGICKÝCH ASISTENTŮ ČESKÉ REPUBLIKY, z.s.

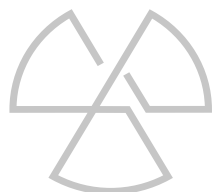
THE CZECH RADIOGRAPHERS SOCIETY

Člen EFRS

Vydavatel časopisu Praktická radiologie

SRLA ČR
Náves Svobody 35/47, 779 00 Olomouc

WWW.SRLA.CZ



Obsah

Seznam zkratk a fyzikálních jednotek	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	17
Předmluva	19
Úvod	21
1 Radiační ochrana při lékařském ozáření	23
1.1 Princip zdůvodnění	23
1.2 Princip optimalizace	24
1.3 Princip limitování dávek	25
1.4 Princip bezpečnosti zdrojů	25
2 Zobrazovací řetězec	27
2.1 Rentgenka	27
2.1.1 Katoda	27
2.1.2 Anoda	29
2.1.3 Další části rentgenky	30
2.1.4 Velikost ohniska	30
2.1.5 Efekt stínění katody	32
2.1.6 Charakteristiky rentgenky	33
2.1.7 Efekt zeslabení anody	37
2.1.8 Typy rentgenek	38
2.2 Produkce rentgenového záření	40
2.2.1 Brzdné záření	41
2.2.2 Charakteristické záření	43
2.3 Spektrum rentgenového záření	44
2.3.1 Rentgenové spektrum kvalitativně a kvantitativně	44
2.3.2 Parametry charakterizující rentgenové spektrum	47
2.4 Interakce záření s pacientem	48
2.4.1 Fotoelektrický jev	49
2.4.2 Comptonův rozptyl	52
2.4.3 Další typy interakcí	53
2.4.4 Rozdíl mezi vázanou a volnou částicí	54
2.5 Detekce záření	56
2.5.1 Nepřímá digitalizace	57
2.5.2 Zesilovač obrazu	58
2.5.3 Přímá digitalizace	59
2.5.4 Detektory čítající jednotlivé částice	60
2.6 Rozptýlené záření a jeho redukce	61
2.7 Expoziční parametry	64
2.8 Kvalita obrazu a její hodnocení	65

2.8.1	Prostorové rozlišení	66
2.8.2	Rozlišení při nízkém kontrastu	75
2.8.3	Šum	77
2.8.4	Artefakty	79
2.9	Zpracování, zobrazení a archivace dat	81
3	Zobrazovací modalita	89
3.1	Skiografie	90
3.2	Mamografie	91
3.2.1	Vznik obrazu v mamografii	92
3.2.2	Mamografický rtg systém	94
3.2.3	Zobrazení a archivace dat	97
3.2.4	Digitální tomosyntéza v mamografii	97
3.3	Dentální radiologie	99
3.4	Angiografie, intervenční a skiaskopické výkony	100
3.4.1	Angiografický systém	101
3.4.2	Volba expozičních parametrů a princip fungování expoziční automatiky	102
3.4.3	Zobrazovací módy	104
3.4.4	Faktory ovlivňující dávku pacientovi	108
3.5	Výpočetní tomografie	112
3.5.1	CT skener	113
3.5.2	Rekonstrukce CT obrazu	116
3.5.3	Základní parametry CT obrazu	123
3.5.4	Parametry skenování u CT	124
3.5.5	Módy náběru dat	133
3.5.6	Volba expozičních parametrů a fungování expoziční automatiky	135
3.5.7	Technologie a faktory ovlivňující dávku pacientovi	137
3.5.8	CT artefakty	143
3.5.9	Spektrální CT zobrazování	146
4	Dozimetrie pacientů	151
4.1	Veličiny používané v rentgenové diagnostice	151
4.1.1	Fyzikální veličiny	151
4.1.2	Veličiny pro odhad rizika	159
4.2	Způsoby dozimetrie a odhadu dávek	161
4.3	Průměrné dávky pro rentgenové výkony	171
5	Radiobiologie	177
5.1	Deterministické účinky záření	178
5.2	Stochastické účinky záření	179
6	Ozáření v těhotenství	185
6.1	Poškození plodu v důsledku ozáření při rentgenových výkonech	185
6.1.1	Deterministické účinky na plod	185
6.1.2	Stochastické účinky na plod	186
6.2	Dávky na plod při různých rentgenových výkonech	187
6.3	Odhad dávky na plod	188
6.4	Postup při ozáření plodu	189

7	Použití ochranného stínění u pacientů	193
7.1	Stínění orgánů v primárním rentgenovém svazku	193
7.2	Stínění orgánů mimo primární rentgenový svazek	195
8	Radiační ochrana pracovníků v radiodiagnostice	199
8.1	Radiační ochrana pracovníků na skiografickém pracovišti	200
8.2	Radiační ochrana pracovníků na CT pracovišti	200
8.3	Radiační ochrana pracovníků na skiaskopickém a katetrizačním sále	200
8.4	Rizika spojená s prací s rentgenovým zářením	205
9	Management dávek záření	211
9.1	DICOM standard	212
9.2	Dostupné zdroje informací o dávkách	212
9.3	Anonymizace dat	215
9.4	Programy pro sledování dávek	217
9.5	Diagnostické referenční úrovně	218
9.6	Radiologické standardy a klinické audity	219
10	Testovací otázky	221
	Otázky	221
	Správné odpovědi	251
	O autorce	263
	Rejstřík	265
	Souhrn	271
	Summary	273

Seznam zkratek a fyzikálních jednotek

AAPM	Americká asociace fyziků v medicíně (American Association of Physicists in Medicine)
ABC	automatické řízení jasu (Automatic Brightness Control)
ADRC	expoziční automatika u angiografických a skiaskopických systémů (Automatic Dose Rate Control)
AEC	expoziční automatika (Automatic Exposure Control)
ALARA	tak nízký, jak je rozumně dosažitelné (As Low As Reasonably Achievable)
AP	předozadní projekce (Antero-Posterior)
ATCM	automatická modulace proudu (Automatic Tube Current Modulation)
B	faktor zpětného rozptylu (Backscatter factor)
CBCT	Cone-Beam CT
CD	kaudální (projekce, směr)
CNR	poměr kontrastu a šumu (Contrast-to-Noise Ratio)
CNRD	poměr kontrast/šum a dávky (Contrast-to-Noise Ratio to Dose)
CR	nepřímá digitalizace (Computed Radiography)
CR	kraniální (projekce, směr)
CT	výpočetní tomografie (Computed Tomography)
CTDI	kermový index výpočetní tomografie (Computed Tomography Dose Index)
CTDI _{VOL}	objemový (volumetrický) CTDI
CTDI _w	vážený CTDI
D	absorbovaná dávka
D_G	střední dávka v mléčné žláze
D_T	orgánová dávka v orgánu T
DICOM	formát dat (Digital Imaging and Communications in Medicine)
DR	digitální radiografie (přímá digitalizace)
DRÚ	diagnostická referenční úroveň
DQE	detekční kvantová účinnost (Detective Quantum Efficiency)
DSA	digitální subtrakční angiografie
E	efektivní dávka
ERCP	endoskopická retrográdní cholangiopankreatografie
ESF	odezva na hranu (Edge Spread Function)
FoV	oblast zájmu (Field of View)
FWHM	šířka píku v polovině maxima (Full Width at Half Maximum)
G	podíl energie vynaložené na vznik brzdného záření
GSDF	funkce pro zobrazení stupňů šedi na diagnostickém monitoru (Grayscale Standard Display Function)
H_T	ekvivalentní dávka v orgánu T
HU	Hounsfieldova jednotka (jednotka pro CT čísla)
HVL	polotloušťka (Half-Value Layer)
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency)
ICRP	Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (International Commission on Radiological Protection)

IRP	intervenční referenční bod, vstupní referenční bod pacienta (Interventional Reference Point)
IQ	intelligenční kvocient (Intelligence Quotient)
K	kerma (Kinetic Energy Released in MATter)
K_e	vstupní povrchová kerma
K_i	dopadající kerma
LAO	levá šikmá projekce (Left Anterior Oblique)
LAT	boční (laterální)
LET	lineární přenos energie (Linear Energy Transfer)
LSF	odezva na čárový impulz (Line Spread Function)
MDRÚ	místní diagnostická referenční úroveň
MIP	rekonstrukce maximálních intenzit (Maximum Intensity Projection)
MPR	multiplanární rekonstrukce (MultiPlanar Reconstruction)
MR	magnetická rezonance (Magnetic Resonance)
MRS	místní radiologické standardy
MTF	modulační přenosová funkce (Modulation Transfer Function)
NDRÚ	národní diagnostická referenční úroveň
NRS	<i>Národní radiologické standardy</i>
PA	zadopřední projekce (Postero-Anterior)
PACS	archivační systém (Picture Archiving and Communications Systems)
PCD	detektory čítající jednotlivé částice (Photon-Counting Detectors)
P_{KA}	součin kermy a plochy (Kerma-Area Product)
P_{KL}	součin kermy a délky (Kerma-Length Product)
PMMA	polymethylmetakrylát, plexisklo
PSF	odezva na bodový impulz (Point Spread Function)
RAO	pravá šikmá projekce (Right Anterior Oblique)
RDSR	strukturovaná zpráva o radiační dávce (Radiation Dose Structured Report)
rtg	rentgenový
SNR	poměr signálu a šumu (Signal-to-Noise Ratio)
SNRD	poměr signál/šum a dávky (Signal-to-Noise Ratio to Dose)
SPR	poměr rozptýleného a primárního záření (Scatter-to-Primary Ratio)
SSDE	CTDI normované na efektivní průměr pacienta (Size-Specific Dose Estimate)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TFT	thin-film tranzistorová matice
TIPS	transjugulární intrahepatální portosystémová spojka
TLD	termoluminiscenční dozimetr, dozimetrie
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
US	ultrazvuk (UltraSonography)
VRT	technika objemového zobrazení (Volume Rendering Technique)
WL	střed zobrazeného okna ve stupních šedi (Window Level)
w_Q	radiační váhový faktor
w_T	tkáňový váhový faktor
WW	šířka zobrazeného okna ve stupních šedi (Window Width)
Y	výtěžnost rentgenky

Seznam obrázků

Není-li uvedeno jinak, pocházejí obrázky z archivu autorky.

2.1	Základní části rentgenky	28
2.2	Fokuzací mistička rentgenky pro usměrnění elektronů dopadajících na anodu	28
2.3	Pevná (vlevo) a rotační (vpravo) anoda	29
2.4	Terčík rotační anody	30
2.5	Vliv napětí na fokuzací mističku na tvar ohniska	31
2.6	Skutečná a efektivní velikost ohniska	32
2.7	Katodová charakteristika rentgenky s efektem stínění katody	33
2.8	Zatěžovací charakteristika anody (Toshiba – ROTANODE E79016X, ohnisko 1,0 mm, rotace anody 9000 otáček/min)	35
2.9	Vychlazovací a zahřívací charakteristika anody (Philips – Technical data MRC-GS 200 0508)	36
2.10	Angiografická charakteristika anody	36
2.11	Intenzita rtg svazku při heel efektu (efektu zeslabení anody)	38
2.12	Schéma rotační rentgenky	40
2.13	Rotační rentgenka Straton (Siemens)	40
2.14	Interakce elektronů při vzniku brzdného záření	41
2.15	Spektrum brzdného záření – filtrované a nefiltrované	42
2.16	Rentgenové spektrum – brzdné a charakteristické záření	43
2.17	Rentgenová spektra pro různá napětí, spektra vytvořena v programu SpekCalc	45
2.18	Rentgenová spektra s různými filtracemi, spektra vytvořena v programu SpekCalc	46
2.19	Vliv zvlnění napětí na tvar spektra	46
2.20	Závislost hmotnostního součinitele na energii pro fotoefekt pro různé materiály	50
2.21	Závislost hmotnostního součinitele různých typů interakcí na energii pro různé energie pro měkkou tkáň	51
2.22	Zastoupení interakcí v závislosti na protonovém čísle materiálu Z a na energii	51
2.23	Schematické znázornění Comptonova rozptylu	52
2.24	Vliv napětí na kontrast obrazu – zleva 60 kV, 75 kV, 120 kV (Upstate Medical University)	53
2.25	Konstrukce zesilovače obrazu (G1, G2, G3 – elektrody)	58
2.26	Vstupní okénko zesilovače obrazu	59
2.27	Původní obraz rtg hrudníku při 120 kV, obraz měkkých tkání (po subtrakci kostí), obraz kostí (Bushberg et al. <i>The essential physics of medical imaging</i> , 2012)	61
2.28	Protirozptylová mřížka a její základní parametry	63
2.29	Paralelní (nefokuzovaná) a divergentní (fokuzovaná) mřížka	63
2.30	Obraz s použitím protirozptylové mřížky a bez ní na fantomu o tloušťce 30 cm – dávka mezi obrazy se liší 4×	64

2.31	Simulace bodového impulzu a výsledný obraz odezvy – Point Spread Function (PSF)	67
2.32	Simulace čárového impulzu a výsledný obraz odezvy – Line Spread Function (LSF)	68
2.33	Odezva na bodový impulz (PSF), na čárový impulz (LSF) a na hranu (ESF)	68
2.34	Prostorové rozlišení ve frekvenční doméně (u každého páru čar je udána tloušťka čáry Δ , rozlišení (lp/mm) se vypočte jako $1/(2\Delta)$, www.ceessentials.net)	69
2.35	Konvoluce původního objektu s odezvou na bodový impulz a ukázka modulační přenosové funkce	69
2.36	Pokles kontrastu obrazu pro vyšší frekvenci v objektu	70
2.37	Limitní prostorové rozlišení	71
2.38	MTF pro jednotlivé části zobrazovacího řetězce (A, B, C) a výsledná MTF (celý systém)	71
2.39	Průběh vzorkovaného signálu	72
2.40	Vzorkování signálu	72
2.41	Vzorkování signálu při detekci digitálním detektorem	73
2.42	Vstupní signál a jeho podvzorkování	73
2.43	Oblasti pro výpočet CNR	76
2.44	Oblasti pro výpočet SNR	76
2.45	Příspěvek elektronického šumu k měřenému signálu	78
2.46	Strukturní šum digitálního detektoru	78
2.47	Rentgenový obraz s různým počtem pixelů: 1024^2 (vlevo nahoře), 64^2 (vpravo nahoře), 32^2 (vlevo dole) a 16^2 (vpravo dole) (Bushberg et al. <i>The essential physics of medical imaging</i> , 2012)	82
2.48	Rentgenový obraz s různou bitovou hloubkou – bitová hloubka 8 (vlevo nahoře), 3 (vpravo nahoře), 2 (vlevo dole) a 1 (vpravo dole) (Bushberg et al. <i>The essential physics of medical imaging</i> , 2012)	82
2.49	Různá nastavení WL a WW pro CT obraz (Pracoviště radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM)	84
2.50	MPR zobrazující povodí koronární tepny (Pracoviště radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM)	85
2.51	MIP rekonstrukce (Pracoviště radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM)	85
2.52	VRT rekonstrukce (Pracoviště radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM)	85
3.1	Vyzářená energie na jednoho pacienta pro různé zobrazovací modality (osa X udává rozsah používaných napětí, osa Y udává hodnotu součinu napětí, proudu rentgenky a doby expozice na jednoho pacienta)	89
3.2	Exponenciální zeslabení záření při pronikání tkání pacienta	91
3.3	Obraz získaný systémem film-fólie (vlevo) a digitální technologií (vpravo) (se souhlasem Radiodiagnostické kliniky Všeobecné fakultní nemocnice v Praze)	92
3.4	Lineární součinitele zeslabení pro jednotlivé tkáně v mamografii – tuk, glandulární tkáň a duktální karcinom	93

3.5	Subjektivní kontrast mezi duktnálním karcinomem a glandulární tkání v závislosti na energii	93
3.6	Konstrukce mamografického rtg systému	94
3.7	Nefiltrované Mo spektrum se součinitelem zeslabení Mo filtru	95
3.8	Mamografické rtg spektrum s kombinací Mo/Mo a Mo/Rh (anoda/terčík)	96
3.9	Mamografické rtg spektrum s kombinací Rh/Rh a nepoužitelné spektrum s kombinací Rh/Mo	96
3.10	Obraz z digitální mamografie (vlevo) a obraz zrekonstruovaný z tomosyntézy (vpravo) (se souhlasem Radiodiagnostické kliniky Všeobecné fakultní nemocnice v Praze)	98
3.11	Intraorální rtg snímek (Pracoviště odborné ambulantní péče IKEM)	99
3.12	Panoramatický rtg snímek (Pracoviště odborné ambulantní péče IKEM) ...	100
3.13	Fungování automatiky řízení dávkového příkonu (ADRC) v závislosti na velikosti (tloušťce) pacienta	103
3.14	Vliv přidavné Cu filtrace na rtg spektrum (základní filtrace 3,0 mm Al) ...	103
3.15	Akviziční (vlevo) a skiaskopický (vpravo) obraz koronárních tepen: dávka při akvizici je 4,5× vyšší než u skiaskopie (Klinika radiologie IKEM)	105
3.16	Obraz s kontrastní látkou a obraz po odečtení nativního obrazu (masky): DSA (Pracoviště radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM)	106
3.17	Kontinuální skiaskopie (nahore), pulzní skiaskopie (uprostřed) a pulzní skiaskopie s grid-switched technologií (dole)	107
3.18	Obraz z pulzní a kontinuální skiaskopie (<i>AAPM Report 125, 2012</i>)	108
3.19	Dávka na jeden snímek v závislosti na tloušťce pacienta pro detektor o velikosti 25 cm	109
3.20	Geometrie rtg svazku v CT skeneru	113
3.21	CT geometrie bez bow-tie filtru a příslušný dávkový profil na detektoru ...	114
3.22	CT geometrie s bow-tie filtrem a příslušný dávkový profil na detektoru ...	115
3.23	Dávková distribuce ve fantomu v závislosti na použitém bow-tie filtru	115
3.24	Ukázka 1D protirozptylové mřížky u CT	116
3.25	Obrazová matice se součiniteli zeslabení a profil zeslabení	117
3.26	Obrazová matice se součiniteli zeslabení v jiné projekci	118
3.27	Profily zeslabení pro zjednodušený model fantomu	118
3.28	Ukázka vzniku sinogramu a samotného sinogramu	119
3.29	Zpětná projekce profilů zeslabení do matice obrazu	119
3.30	Sinogram a rekonstruovaný obraz v horní části, v dolní části filtrovaný sinogram a tomu příslušný obraz (Bushberg et al. <i>The essential physics of medical imaging</i> , 2012)	120
3.31	Rekonstrukce filtrovanou zpětnou projekcí a iterativní rekonstrukcí SAFIRE se silou 1, 3 a 5 (Pracoviště radiodiagnostiky a intervenční radiologie IKEM)	121
3.32	Hmotnostní součinitel zeslabení v závislosti na energii svazku pro měkkou tkáň, kost a jod (šedým pruhem je zvýrazněna oblast rtg svazků na CT – napětí 70–140 kV odpovídají efektivní energie cca 45–60 keV) ...	122
3.33	Ukázka náběru dat pro dva různé pitch faktory (nahore menší pitch faktor, dole větší)	125