

Stanovení absorbované dávky pro nestandardní vysokoenergetická fotonová pole

Stručný návod pro stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro FFF svazky, CyberKnife, tomoterapeutické ozařovače a Leksellův gama nůž

Obsah

1	Úvod	2
2	Zkratky a pojmy	2
3	Referenční dozimetrie pro FFF svazky – stručný návod	3
3.1	Stanovení kvality FFF svazku $TPR_{20,10}(10)$	3
3.2	Referenční podmínky	3
3.3	Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek.....	4
3.4	Korekce na ovlivňující veličiny	6
3.5	Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek	7
4	Referenční dozimetrie pro ozařovače CyberKnife – stručný návod	8
4.1	Referenční podmínky	8
4.2	Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek.....	8
4.3	Korekce na ovlivňující veličiny	9
4.4	Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek	11
5	Referenční dozimetrie pro tomoterapeutické ozařovače – stručný návod	12
5.1	Referenční podmínky	12
5.2	Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek.....	12
5.3	Korekce na ovlivňující veličiny	13
5.4	Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek	15
6	Referenční dozimetrie pro Leksellův gama nůž – stručný návod.....	16
6.1	Referenční podmínky	16
6.2	Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek.....	16
6.3	Korekce na ovlivňující veličiny	17
6.4	Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek	18
7	Příloha: Formalismus pro nestandardní pole – stručný popis.....	19
8	Literatura	20

1 Úvod

V tomto stručném doporučení je uveden postup (tzv. code of practice) pro **stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek ve statických msr polích** pro FFF svazky na klasických urychlovačích (kapitola 3), pro ozařovače CyberKnife (kapitola 4), pro tomoterapeutické ozařovače (kapitola 5) a pro Leksellův gama nůž (kapitola 6), tedy pro modalitu, na kterých nemohou být ustaveny konvenční referenční podmínky uvedené v TRS 398 [2]. Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro tyto ozařovače využívá formalismu uvedeného v doporučení TRS 483 [1].

Cílem tohoto doporučení je zejména poskytnout čtenářům stručný přímočarý návod pro stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro výše uvedené ozařovače.

TRS 483 navazuje na TRS 398 i na AAPM TG-51 [3]. V doporučení TRS 483 [1] je pro vysokoenergetické fotonové svazky popsán jak formalismus nestandardních polí (machine specific reference fields), tak i formalismus malých polí. Pro relativní dozimetrii malých polí se doporučuje postupovat přímo podle kapitoly 6 doporučení TRS 483.

Podrobnější informace k formalismu stanovení dávky a další aspekty souvisejí s dozimetrií malých a nestandardních polí naleznou čtenáři v doporučení TRS 483.

2 Zkratky a pojmy

FFF svazek Svazek bez homogenizačního filtru (Flattening filter free beam)

WFF svazek Svazek s homogenizačním filtrem (Beam with flattening filter)

f_{ref} Konvenční referenční pole (homogenní pole o velikosti 10 cm x 10 cm), používané pro kalibraci v kalibrační laboratoři (standard laboratory) a pro referenční dozimetrii dle TRS 398

f_{msr} Referenční pole pro specifický ozařovač (Machine specific reference field), které se zavádí v případě, že nemůže být na daném ozařovači ustaveno konvenční referenční pole

r_{LCPE} Minimální poloměr kruhového pole, pro který absorbovaná dávka ve vodě ve středu pole je vztažena konstantou ke kermě ve vodě (Lateral charged particle equilibrium range, str. 36 v TRS 483)

SAD Vzdálenost měřená podél osy svazku záření od zdroje záření k izocentru (Source to axis distance)

SSD Vzdálenost měřená podél osy svazku záření od zdroje záření ke vstupnímu povrchu fantomu (Source to surface distance)

SDD Vzdálenost měřená podél osy svazku záření od zdroje záření k detektoru (Source to detector distance)

$TPR_{20/10}$ Podíl dávek ionizační komory umístěné v konstantní vzdálenosti od zdroje (v izocentru) v hloubce 20 cm vody a 10 cm vody při velikosti pole 10 cm x 10 cm v rovině izocentra (index kvality v TRS 398)

Značení veličin a symbolů v tomto dokumentu je shodné se značením v TRS 483 za účelem snadného dohledávání a porozumění.

3 Referenční dozimetrie pro FFF svazky – stručný návod

3.1 Stanovení kvality FFF svazku $TPR_{20,10}(10)$

1. Stanoví se $TPR_{20,10}$

Tabulka 3.1: Referenční podmínky pro stanovení $TPR_{20,10}$ [Tabulka 18 z TRS 483]

Materiál fantomu	Voda
Typ komory	Cylindrická nebo planparalelní (uvedená v Tabulce 3.4)
Hloubka měření	20 g/cm ² a 10 g/cm ²
Referenční bod komory	Pro cylindrickou komoru na centrální ose ve středu objemu dutiny, pro planparalelní vnitřní povrch vstupního okénka v jeho středu
Umístění referenčního bodu	Pro oba typy komor do hloubky měření
Orientace stopky komory	Kolmo k ose svazku
SDD	100 cm
Tvar a velikost pole f_{msr} v SDD	10 cm x 10 cm (nehomogenní)

SDD ... vzdálenost zdroj záření – detektor

Při stanovování $TPR_{20,10}$ by se měla zjistit případná rozdílnost korekcí na rekombinaci pro dvě různé hloubky měření a v případě potřeby ji vzít v úvahu. $TPR_{20,10}$ je zde možné stanovovat jako podíl odezev ionizačních komor ve dvou hloubkách (bez dalšího převodu na podíl dávek).

2. Stanoví se velikost ekvivalentního homogenního čtvercového pole S

Tabulka 3.2: Velikost ekvivalentního homogenního čtvercového pole S [Hodnoty z Tabulky 16 a 17 TRS 483]

Svazek	S
Pro 6-7 MV FFF svazky	9,5 cm
Pro 10 MV FFF svazky	9,1 cm

3. Stanoví se $TPR_{20,10}(10)$ dle vztahu Palmanse:

$$TPR_{20,10}(10) = \frac{TPR_{20,10}(S) + c(10-S)}{1 + c(10-S)} \quad (3.1)$$

kam za $TPR_{20,10}(S)$ se dosadí $TPR_{20,10}$ změřené v poli f_{msr} v bodě 1., za S se dosadí S stanovené v bodě 2.

$c = (16,15 \pm 0,12) \times 10^{-3}$ pro $4 \leq S \leq 12$, kde S je velikost ekvivalentního homogenního čtvercového pole v cm.

3.2 Referenční podmínky

Tabulka 3.3: Referenční podmínky pro stanovení absorbované dávky ve vodě pro FFF svazky [Tabulka 8 z TRS 483]

Materiál fantomu	Voda
Velikost fantomu	Alespoň 30 cm x 30 cm x 30 cm
Typ komory	Cylindrická (uvedená v Tabulce 3.4)
Hloubka měření z_{ref}	10 g/cm ²
Referenční bod komory	Na centrální ose ve středu objemu dutiny
Umístění referenčního bodu	Do hloubky měření z_{ref}
SSD/SDD	100 cm
Tvar a velikost pole f_{msr}	10 cm x 10 cm* (nehomogenní)

*Velikost pole je pro SSD techniku definována na povrchu fantomu, pro SAD techniku v rovině izocentra ozařovače.

3.3 Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Absorbovaná dávka ve vodě se stanoví dle vztahu (3.2):

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} \quad (3.2)$$

kde $D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je absorbovaná dávka ve vodě v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} v referenční hloubce z_{ref} ve vodě a za nepřítomnosti ionizační komory,

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je odečet dozimetru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} obsahující součin korekčních faktorů na ovlivňující veličiny (tlak, teplota a vlhkost vzduchu, kalibrace elektrometru, polarizační jev a účinnost sběru náboje),

$N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}}$ je kalibrační koeficient pro veličinu absorbovaná dávka ve vodě pro ionizační komoru v konvenčním referenčním poli f_{ref} ve svazku referenční kvality Q_0 (většinou ^{60}Co),

$k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ je korekční faktor zohledňující rozdíly mezi odezvou detektoru v poli f_{ref} ve svazku kvality Q_0 a odezvou detektoru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} ,

přičemž f_{ref} je konvenční referenční pole, tj. homogenní pole o velikosti 10 cm x 10 cm, f_{msr} je tzv. machine specific reference field (viz Tabulka 3.3) a Q_{msr} je kvalita svazku f_{msr} pole.

Pokud je kalibračním svazkem svazek ^{60}Co , symbol pro korekční faktor pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ se zjednodušuje na $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$.

Do vztahu (3.2) se z Tabulky 3.4 pro použitou ionizační komoru dosadí hodnota $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$ pro $\text{TPR}_{20,10}(10)$ stanovené v bodě 3 kapitoly 3.1. Žádné další korekce se již neprovádějí. Korekční faktory v Tabulce 3.4 v sobě již zahrnují korekce na rozdílnost spekter a objemový efekt ionizačních komor ve FFF svazku.

Tabulka 3.4: Korekční faktory $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ pro konvenční referenční pole f_{ref} (10 cm x 10 cm) pro referenční ionizační komory pro použití ve FFF svazcích lineárních urychlovačů (jako funkce $TPR_{20,10}(10)$) [Hodnoty korekčních faktorů $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ jsou pro FFF svazky převzaty z Tabulky 13 z TRS 483.]

Ionizační komora	TPR _{20,10} (10)				
	0,63	0,66	0,69	0,72	0,75
Capintec PR-06C/G Farmer	0,996	0,995	0,992	0,988	0,981
Exradin A2 Spokas	0,996	0,996	0,993	0,989	0,983
Exradin A12 Farmer	0,998	0,997	0,994	0,991	0,984
Exradin A12S	0,994	0,993	0,989	0,984	0,977
Exradin A19	0,995	0,995	0,991	0,987	0,981
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	0,995	0,994	0,991	0,986	0,979
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	0,997	0,996	0,993	0,990	0,983
NE 2505/3, 3A Farmer	0,996	0,996	0,993	0,990	0,985
NE 2571 Farmer	0,960	0,995	0,993	0,990	0,985
NE 2611	0,994	0,992	0,989	0,985	0,979
PTW 23331 rigid	0,995	0,993	0,990	0,985	0,980
PTW 23332 rigid	0,995	0,993	0,988	0,983	0,976
PTW 23333 (3 mm cap)	0,995	0,993	0,990	0,985	0,978
PTW 30001 Farmer	0,995	0,994	0,990	0,986	0,979
PTW 30010 Farmer	0,995	0,994	0,990	0,986	0,979
PTW 30002/30011 Farmer	0,995	0,994	0,992	0,988	0,982
PTW 30004/30012 Farmer	0,997	0,996	0,994	0,990	0,984
PTW 30006/30013 Farmer	0,995	0,994	0,990	0,985	0,978
PTW 31003/31013 Semiflex	0,995	0,993	0,990	0,985	0,978
SNC 100700-0 Farmer	0,996	0,995	0,992	0,987	0,979
SNC 100700-1 Farmer	0,998	0,998	0,995	0,991	0,985
Victoreen Radocon III 555	0,992	0,990	0,985	0,979	0,973
Victoreen 30-348	0,993	0,991	0,987	0,981	0,973
Vicotreen 30-351	0,994	0,992	0,988	0,984	0,977
Victoreen 30-349	0,994	0,992	0,988	0,983	0,978
Vicotreen 30-361	0,994	0,992	0,988	0,983	0,976
IBA FC-65P (Wellhöfer IC69) Farmer	0,996	0,995	0,992	0,987	0,978
IBA FC-65G (Wellhöfer IC70) Farmer	0,997	0,997	0,994	0,990	0,983

3.4 Korekce na ovlivňující veličiny

Korekce na tlak, teplotu a vlhkost vzduchu se provádí postupem uvedeným v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.1.

Korekční faktor na tlak a teplotu k_{TP} se stanoví pomocí vzorce (3.3):

$$k_{TP} = \frac{(T + 273,15) P_0}{(T_0 + 273,15) \bar{P}} \quad (3.3)$$

Kde T je teplota vzduchu v dutině ionizační komory (v °C), P je tlak vzduchu v dutině ionizační komory (v kPa), T_0 a P_0 jsou referenční hodnoty teploty a tlaku, pro něž platí kalibrační koeficient ionizační komory. Referenční hodnoty tlaku, P_0 , a teploty, T_0 , jsou obvykle 101,3 kPa a 20 °C, ale v některých zemích je referenční teplota 22 °C. Referenční hodnoty teploty a tlaku pro použitou ionizační komoru jsou uvedeny v jejím kalibračním listu.

Oprava odezvy elektrometru se neaplikuje, pokud se ionizační komora a elektrometr kalibrují společně jako jedno měřící zařízení.

Korekční faktor na polaritu k_{pol} je dán následujícím vztahem:

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad (3.4)$$

kde M_+ je odečet elektrometru při kladné polaritě, M_- je odečet elektrometru při záporné polaritě a M je odečet elektrometru při polaritě běžně používané, která je stejná jako při kalibraci ionizační komory. V případě, kdy kalibrační laboratoř neaplikovala tuto korekci, se postupuje dle postupu uvedeného v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.3. Korekce na polaritu může být závislá na velikosti pole (kvůli ozáření různé délky kabelu), toto je třeba prošetřit.

Korekční faktor na rekombinaci iontů: Pro FFF svazky, kde jsou hodnoty dávek na puls podstatně vyšší než u svazků s homogenizačním filtrem, je dle doporučení TRS 483 [1] možné použít dvounapětovou metodu představenou v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.4. Dle této metody se pro pulzní svazky korekční faktor na rekombinaci k_s stanoví pomocí vzorce (3.5), kde konstanty a_i jsou uvedeny v Tabulce 3.4. Dvounapětová metoda předpokládá lineární závislost mezi převrácenými hodnotami odečtu $1/M$ a sběrného napětí $1/V$. Pracuje s odečty M_1 a M_2 získanými při napětích V_1 a V_2 , a stejných ozařovacích podmínkách. V_1 je normální napětí a V_2 je napětí redukované ideálně alespoň na třetinu. Polarizační efekt může být různý při různých napětích a proto odečty M_1 a M_2 by měly být na tento efekt opraveny podle vztahu (3.4).

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \quad (3.5)$$

Je-li přibližně $k_s < 1,03$, pak opravu na rekombinaci iontů lze spočítat s přiblížením lepším než 0,1% pomocí vztahu (3.6):

$$k_s = 1 + \frac{\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{-1} - 1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-1} - 1} \quad (3.6)$$

Tabulka 3.4: Kvadratické proložení hodnotami, opravy na neúplnost sběru náboje k_s v pulzních svazcích jako funkce poměru sběrného napětí V_1/V_2 [4] [Tabulka 21 z TRS 483]

V_1/V_2	a_0	a_1	a_2
2,0	2,337	-3,636	2,299
2,5	1,474	-1,587	1,114
3,0	1,198	-0,875	0,677
3,5	1,080	-0,542	0,463
4,0	1,022	-0,363	0,341
5,0	0,975	-0,188	0,214

Kalibrační list za referenčních podmínek vydaný kalibrační laboratoří má jasně vypovídat, jestli oprava na rekombinaci byla provedena, či nikoliv. Předcházející úvahy předpokládají, že kalibrační laboratoř provedla opravu na rekombinaci, a tudíž všechny uvedené postupy stanovení opravy k_s se vztahují pouze k rekombinaci v uživatelském svazku. Pokud kalibrační laboratoř neprovedla opravu na rekombinaci, pak oprava stanovená pro rekombinaci v uživatelském svazku kvality Q musí být podělena opravou ve svazku kalibračním kvality Q_0 , tak že

$$k_s = \frac{k_{s,Q}}{k_{s,Q_0}} \quad (3.7)$$

Pokud je kalibrační svazek kontinuální, pak oprava bývá velmi blízká jedné a neprovedení této opravy při kalibraci, případně nepoužití vztahu (3.7) bude mít většinou pouze zanedbatelný vliv.

3.5 Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Odhad kombinované relativní standardní nejistoty doporučených hodnot korekčních faktorů pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ uvedených v Tabulce 3.3 je pro FFF svazky dle doporučení TRS 483 1% (pro $k = 1$). Tato hodnota číselně odpovídá odhadu kombinované relativní standardní nejistoty korekčních faktorů pro kvalitu svazku k_Q pro svazky fotonů vysokých energií s homogenizačním filtrem (viz Tabulka 15 resp. 6.IV v doporučení TRS 398).

Při stanovování nejistoty absorbované dávky za referenčních podmínek lze tedy převzít pro FFF svazky většinu hodnot dílčích nejistot uvedených v Tabulce 15 (resp. 6.IV) v doporučení TRS 398. Je ale nutné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dávkového kalibračního koeficientu ionizační komory. A je vhodné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dlouhodobé stability uživatelova referenčního dozimetrického řetězce.

Typická hodnota odhadu relativní standardní nejistoty stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro svazky fotonů vysokých energií s homogenizačním filtrem uvedená v doporučení TRS 398 je 1,5% ($k = 1$). Stejnou typickou hodnotu lze použít také pro FFF svazky.

4 Referenční dozimetrie pro ozařovače CyberKnife – stručný návod

4.1 Referenční podmínky

Tabulka 4.1: Referenční podmínky pro stanovení absorbované dávky ve vodě pro ozařovač CyberKnife [Tabulka 9 z TRS 483]

Materiál fantomu	Voda
Velikost fantomu	Alaspoň 30 cm x 30 cm x 30 cm
Typ komory	Cylindrická (uvedená v Tabulce 4.2)
Hloubka měření z_{ref}	10 g/cm ²
Referenční bod komory	Na centrální ose ve středu objemu dutiny
Umístění referenčního bodu	Do hloubky měření z_{ref}
SDD (vzdálenost zdroj záření – detektor)	80 cm
Tvar a velikost pole f_{msr}	Kruhové pole, největší dostupné (pro fixní kolimátor je to pole o průměru 6 cm)

4.2 Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Absorbovaná dávka ve vodě se stanoví dle vztahu (4.1):

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} \quad (4.1)$$

kde $D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je absorbovaná dávka ve vodě v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} v referenční hloubce z_{ref} ve vodě a za nepřítomnosti ionizační komory,

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je odečet dozimetru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} obsahující součin korekčních faktorů na ovlivňující veličiny (tlak, teplota a vlhkost vzduchu, kalibrace elektrometru, polarizační jev a účinnost sběru náboje),

$N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}}$ je kalibrační koeficient pro veličinu absorbovaná dávka ve vodě pro ionizační komoru v konvenčním referenčním poli f_{ref} ve svazku referenční kvality Q_0 (většinou ⁶⁰Co),

$k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ je korekční faktor zohledňující rozdíly mezi odezvou detektoru v poli f_{ref} ve svazku kvality Q_0 a odezvou detektoru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} ,

přičemž f_{ref} je konvenční referenční pole, tj. homogenní pole o velikosti 10 cm x 10 cm, f_{msr} je tzv. machine specific reference field (viz Tabulka 4.1) a Q_{msr} je kvalita svazku f_{msr} pole.

Pokud je kalibračním svazkem svazek ⁶⁰Co, symbol pro korekční faktor pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ se zjednodušuje na $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$.

Do vztahu (4.1) se pro použitou ionizační komoru dosadí hodnota $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$ z Tabulky 4.2.

Tabulka 4.2: Korekční faktory $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$ pro konvenční referenční pole f_{ref} (10 cm x 10 cm) pro referenční ionizační komory pro použití na ozařovačích CyberKnife [Hodnoty korekčních faktorů $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$ jsou pro ozařovač CyberKnife převzaty z Tabulky 13 z TRS 483.]

Ionizační komora	$k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$
Capintec PR-06C/G Farmer	1,000
Exradin A2 Spokas	0,997
Exradin A12 Farmer	1,004
Exradin A12S	0,993

Exradin A19	1,002
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	1,000
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	1,002
NE 2505/3, 3A Farmer	1,003
NE 2571 Farmer	1,003
NE 2611	0,993
PTW 23331 rigid	0,998
PTW 23332 rigid	0,995
PTW 23333 (3 mm cap)	0,998
PTW 30001 Farmer	0,999
PTW 30010 Farmer	0,999
PTW 30002/30011 Farmer	1,001
PTW 30004/30012 Farmer	1,003
PTW 30006/30013 Farmer	0,999
PTW 31003/31013 Semiflex	0,996
SNC 100700-0 Farmer	1,002
SNC 100700-1 Farmer	1,005
Victoreen Radocon III 555	0,995
Victoreen 30-348	0,994
Victoreen 30-351	0,998
Victoreen 30-349	0,997
Victoreen 30-361	0,998
IBA FC-65P (Wellhöfer IC 69) Farmer	1,002
IBA FC-65G (Wellhöfer IC 70) Farmer	1,004

4.3 Korekce na ovlivňující veličiny

Korekce na tlak, teplotu a vlhkost vzduchu se provádí postupem uvedeným v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.1.

Korekční faktor na tlak a teplotu k_{TP} se stanoví pomocí vzorce (4.2):

$$k_{TP} = \frac{(T + 273,15)}{(T_0 + 273,15)} \frac{P_0}{P} \quad (4.2)$$

Kde T je teplota vzduchu v dutině ionizační komory (v °C), P je tlak vzduchu v dutině ionizační komory (v kPa), T_0 a P_0 jsou referenční hodnoty teploty a tlaku, pro něž platí kalibrační koeficient ionizační komory. Referenční hodnoty tlaku, P_0 , a teploty, T_0 , jsou obvykle 101,3 kPa a 20 °C, ale v některých zemích je referenční teplota 22 °C. Referenční hodnoty teploty a tlaku pro použitou ionizační komoru jsou uvedeny v jejím kalibračním listu.

Oprava odezvy elektrometru se neaplikuje, pokud se ionizační komora a elektrometr kalibrují společně jako jedno měřící zařízení.

Korekční faktor na polaritu k_{pol} je dán následujícím vztahem:

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad (4.3)$$

kde M_+ je odečet elektrometru při kladné polaritě, M_- je odečet elektrometru při záporné polaritě a M je odečet elektrometru při polaritě běžně používané, která je stejná jako při kalibraci ionizační komory. V případě, kdy kalibrační laboratoř neaplikovala tuto korekci, se postupuje dle postupu

uvedeného v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.3. Korekce na polaritu může být závislá na velikosti pole (kvůli ozáření různé délky kabelu), toto je třeba prošetřit.

Korekční faktor na rekombinaci iontů: Pro FFF svazky ozařovačů CyberKnife, kde jsou hodnoty dávek na puls podstatně vyšší než u svazků s homogenizačním filtrem, je dle doporučení TRS 483 možné použít dvounapětovou metodu představenou v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.4. Dle této metody se pro pulzní svazky korekční faktor na rekombinaci k_s stanoví pomocí vzorce (4.4), kde konstanty a_i jsou uvedeny v Tabulce 4.3. Dvounapětová metoda předpokládá lineární závislost mezi převrácenými hodnotami odečtu $1/M$ a sběrného napětí $1/V$. Pracuje s odečty M_1 a M_2 získanými při napětích V_1 a V_2 , a stejných ozařovacích podmínkách. V_1 je normální napětí a V_2 je napětí redukované ideálně alespoň na třetinu. Polarizační efekt může být různý při různých napětích a proto odečty M_1 a M_2 by měly být na tento efekt opraveny podle vztahu (4.3).

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \quad (4.4)$$

Je-li přibližně $k_s < 1,03$, pak opravu na rekombinaci iontů lze spočítat s přiblížením lepším než 0,1% pomocí vztahu (4.5):

$$k_s = 1 + \frac{\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{-1}}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-1}} \quad (4.5)$$

Tabulka 4.3: Kvadratické proložení hodnotami, opravy na neúplnost sběru náboje k_s v pulzních svazcích jako funkce poměru sběrného napětí V_1/V_2 [4]. [Tabulka 21 z TRS 483]

V_1/V_2	a_0	a_1	a_2
2,0	2,337	-3,636	2,299
2,5	1,474	-1,587	1,114
3,0	1,198	-0,875	0,677
3,5	1,080	-0,542	0,463
4,0	1,022	-0,363	0,341
5,0	0,975	-0,188	0,214

Kalibrační list za referenčních podmínek vydaný kalibrační laboratoří má jasně vypovídat, jestli oprava na rekombinaci byla provedena, či nikoliv. Předcházející úvahy předpokládají, že kalibrační laboratoř provedla opravu na rekombinaci, a tudíž všechny uvedené postupy stanovení opravy k_s se vztahují pouze k rekombinaci v uživatelském svazku. Pokud kalibrační laboratoř neprovedla opravu na rekombinaci, pak oprava stanovená pro rekombinaci v uživatelském svazku kvality Q musí být podělena opravou ve svazku kalibračním kvality Q_0 , tak že

$$k_s = \frac{k_{s,Q}}{k_{s,Q_0}} \quad (4.6)$$

Pokud je kalibrační svazek kontinuální, pak oprava bývá velmi blízká jedné a neprovedení této opravy při kalibraci, případně nepoužití vztahu (4.6) bude mít většinou pouze zanedbatelný vliv.

4.4 Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Odhad kombinované relativní standardní nejistoty doporučených hodnot korekčních faktorů pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ uvedených v Tabulce 4.2 je pro svazky ozařovačů CyberKnife dle doporučení TRS 483 1% (pro $k = 1$). Tato hodnota číselně odpovídá odhadu kombinované relativní standardní nejistoty korekčních faktorů pro kvalitu svazku k_Q pro svazky fotonů vysokých energií s homogenizačním filtrem (viz Tabulka 15 resp. 6.IV v doporučení TRS 398).

Při stanovování nejistoty absorbované dávky za referenčních podmínek lze tedy převzít pro ozařovače CyberKnife většinu hodnot dílčích nejistot uvedených v Tabulce 15 (resp. 6.IV) v doporučení TRS 398. Je ale nutné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dávkového kalibračního koeficientu ionizační komory. A je vhodné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dlouhodobé stability uživatelského referenčního dozimetrického řetězce.

Typická hodnota odhadu relativní standardní nejistoty stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro svazky fotonů vysokých energií s homogenizačním filtrem uvedená v doporučení TRS 398 je 1,5% ($k = 1$). Stejnou typickou hodnotu lze použít také pro ozařovač CyberKnife.

5 Referenční dozimetrie pro tomoterapeutické ozařovače – stručný návod

5.1 Referenční podmínky

Tabulka 5.1: Referenční podmínky pro stanovení absorbované dávky ve vodě pro tomoterapeutický ozařovač [Tabulka 10 z TRS 483]

Materiál fantomu	Voda
Velikost fantomu	Alespoň 30 cm x 30 cm x 30 cm
Typ komory	Cylindrická (uvedená v Tabulce 5.2)
Hloubka měření z_{ref}	10 g/cm ²
Referenční bod komory	Na centrální ose ve středu objemu dutiny
Umístění referenčního bodu	Do hloubky měření z_{ref}
SSD/SDD	85 cm*
Tvar a velikost pole f_{msr}	Obdélníkové pole (5 cm x 10 cm pro ozařovač TomoTherapy HiArt)

SSD ... vzdálenost zdroj záření – povrch fantomu

SDD ... vzdálenost zdroj záření – detektor

*Použije se referenční SSD/SDD používané v klinické praxi

5.2 Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Absorbovaná dávka ve vodě se stanoví dle vztahu (5.1):

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} \quad (5.1)$$

kde $D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je absorbovaná dávka ve vodě v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} v referenční hloubce z_{ref} ve vodě a za nepřítomnosti ionizační komory,

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je odečet dozimetru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} obsahující součin korekčních faktorů na ovlivňující veličiny (tlak, teplota a vlhkost vzduchu, kalibrace elektrometru, polarizační jev a účinnost sběru náboje),

$N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}}$ je kalibrační koeficient pro veličinu absorbovaná dávka ve vodě pro ionizační komoru v konvenčním referenčním poli f_{ref} ve svazku referenční kvality Q_0 (většinou ⁶⁰Co),

$k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ je korekční faktor zohledňující rozdíly mezi odezvou detektoru v poli f_{ref} ve svazku kvality Q_0 a odezvou detektoru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} ,

příčemž f_{ref} je konvenční referenční pole, tj. homogenní pole o velikosti 10 cm x 10 cm, f_{msr} je tzv. machine specific reference field (viz Tabulka 5.1) a Q_{msr} je kvalita svazku f_{msr} pole.

Pokud je kalibračním svazkem svazek ⁶⁰Co, symbol pro korekční faktor pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ se zjednodušuje na $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$.

Do vztahu (5.1) se pro použitou ionizační komoru dosadí hodnota $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$ z Tabulky 5.2.

Tabulka 5.2: Korekční faktory $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ pro konvenční referenční pole f_{ref} (10 cm x 10 cm) pro referenční ionizační komory pro použití na tomoterapeutických ozařovačích [Hodnoty korekčních faktorů $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ jsou pro tomoterapeutický ozařovač převzaty z Tabulky 13 z TRS 483, pro níž bylo uvažováno $TPR_{20,10}(10) = 0,645$ jako typická hodnota.]

Ionizační komora	$k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$
Capintec PR-06C/G Farmer	0,996
Exradin A2 Spokas	0,996
Exradin A12 Farmer	0,998
Exradin A12S	0,994
Exradin A19	0,995
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	0,995
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	0,997
NE 2505/3, 3A Farmer	0,996
NE 2571 Farmer	0,996
NE 2611	0,993
PTW 23331 rigid	0,994
PTW 23332 rigid	0,994
PTW 23333 (3 mm cap)	0,995
PTW 30001 Farmer	0,995
PTW 30010 Farmer	0,995
PTW 30002/30011 Farmer	0,995
PTW 30004/30012 Farmer	0,997
PTW 30006/30013 Farmer	0,995
PTW 31003/31013 Semiflex	0,994
SNC 100700-0 Farmer	0,996
SNC 100700-1 Farmer	0,998
Victoreen Radocon III 555	0,991
Victoreen 30-348	0,992
Victoreen 30-351	0,993
Victoreen 30-349	0,993
Victoreen 30-361	0,993
IBA FC-65P (Wellhöfer IC 69) Farmer	0,996
IBA FC-65G (Wellhöfer IC 70) Farmer	0,998

5.3 Korekce na ovlivňující veličiny

Korekce na tlak, teplotu a vlhkost vzduchu se provádí postupem uvedeným v doporučení TRS 398 [2] v kapitole 4.4.3.1.

Korekční faktor na tlak a teplotu k_{TP} se stanoví pomocí vzorce (5.2):

$$k_{TP} = \frac{(T + 273,15)}{(T_0 + 273,15)} \frac{P_0}{P} \quad (5.2)$$

Kde T je teplota vzduchu v dutině ionizační komory (v °C), P je tlak vzduchu v dutině ionizační komory (v kPa), T_0 a P_0 jsou referenční hodnoty teploty a tlaku, pro něž platí kalibrační koeficient ionizační komory. Referenční hodnoty tlaku, P_0 , a teploty, T_0 , jsou obvykle 101,3 kPa a 20 °C, ale v některých zemích je referenční teplota 22 °C. Referenční hodnoty teploty a tlaku pro použitou ionizační komoru jsou uvedeny v jejím kalibračním listu.

Oprava odezvy elektrometru se neaplikuje, pokud se ionizační komora a elektrometr kalibrují společně jako jedno měřící zařízení.

Korekční faktor na polaritu k_{pol} je dán vztahem (5.3):

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad (5.3)$$

kde M_+ je odečet elektrometru při kladné polaritě, M_- je odečet elektrometru při záporné polaritě a M je odečet elektrometru při polaritě běžně používané, která je stejná jako při kalibraci ionizační komory. V případě, kdy kalibrační laboratoř neaplikovala tuto korekci, se postupuje dle postupu uvedeného v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.3. Korekce na polaritu může být závislá na velikosti pole (kvůli ozáření různé délky kabelu), toto je třeba prošetřit.

Korekční faktor na rekombinaci iontů: Pro FFF svazky tomoterapeutických ozařovačů, kde jsou hodnoty dávek na puls podstatně vyšší než u svazků s homogenizačním filtrem, je dle doporučení TRS 483 možné použít dvounapěťovou metodu představenou v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.4. Dle této metody se pro pulzní svazky korekční faktor na rekombinaci k_s stanoví pomocí vzorce (5.4), kde konstanty a_i jsou uvedeny v Tabulce 5.3. Dvounapěťová metoda předpokládá lineární závislost mezi převrácenými hodnotami odečtu $1/M$ a sběrného napětí $1/V$. Pracuje s odečty M_1 a M_2 získanými při napětích V_1 a V_2 , a stejných ozařovacích podmínkách. V_1 je normální napětí a V_2 je napětí redukováno ideálně alespoň na třetinu. Polarizační efekt může být různý při různých napětích a proto odečty M_1 a M_2 by měly být na tento efekt opraveny podle vztahu (5.3).

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \quad (5.4)$$

Je-li přibližně $k_s < 1,03$, pak opravu na rekombinaci iontů lze spočítat s přiblížením lepším než 0,1% pomocí vztahu (5.5):

$$k_s = 1 + \frac{\left(\frac{M_1}{M_2}\right) - 1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - 1} \quad (5.5)$$

Tabulka 5.3: Kvadratické proložení hodnotami, opravy na neúplnost sběru náboje k_s v pulzních svazcích jako funkce poměru sběrného napětí V_1/V_2 [4] [Tabulka 21 z TRS 483]

V_1/V_2	a_0	a_1	a_2
2,0	2,337	-3,636	2,299
2,5	1,474	-1,587	1,114
3,0	1,198	-0,875	0,677
3,5	1,080	-0,542	0,463
4,0	1,022	-0,363	0,341
5,0	0,975	-0,188	0,214

Kalibrační list za referenčních podmínek vydaný kalibrační laboratoří má jasně vypovídat, jestli oprava na rekombinaci byla provedena, či nikoliv. Předcházející úvahy předpokládají, že kalibrační laboratoř provedla opravu na rekombinaci, a tudíž všechny uvedené postupy stanovení opravy k_s se vztahují pouze k rekombinaci v uživatelském svazku. Pokud kalibrační laboratoř neprovedla opravu na rekombinaci, pak oprava stanovená pro rekombinaci v uživatelském svazku kvality Q musí být podělena opravou ve svazku kalibračním kvality Q_0 , tak že

$$k_s = \frac{k_{s,Q}}{k_{s,Q_0}} \quad (5.6)$$

Pokud je kalibrační svazek kontinuální, pak oprava bývá velmi blízká jedné a neprovedení této opravy při kalibraci, případně nepoužití vztahu (5.6) bude mít většinou pouze zanedbatelný vliv.

5.4 Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Odhad kombinované relativní standardní nejistoty doporučených hodnot korekčních faktorů pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ uvedených v Tabulce 5.2 je pro svazky tomoterapeutických ozařovačů dle doporučení TRS 483 1% (pro $k = 1$). Tato hodnota číselně odpovídá odhadu kombinované relativní standardní nejistoty korekčních faktorů pro kvalitu svazku k_Q pro svazky fotonů vysokých energií s homogenizačním filtrem (viz Tabulka 15 resp. 6.IV v doporučení TRS 398).

Při stanovování nejistoty absorbované dávky za referenčních podmínek lze tedy převzít pro tomoterapeutické ozařovače většinu hodnot dílčích nejistot uvedených v Tabulce 15 (resp. 6.IV) doporučení TRS 398. Je ale nutné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dávkového kalibračního koeficientu ionizační komory. A je vhodné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dlouhodobé stability uživatele referenčního dozimetrického řetězce.

Typická hodnota odhadu relativní standardní nejistoty stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro svazky fotonů vysokých energií s homogenizačním filtrem uvedená v doporučení TRS 398 je 1,5% ($k = 1$). Stejnou typickou hodnotu lze použít také pro tomoterapeutické ozařovače.

6 Referenční dozimetrie pro Leksellův gama nůž – stručný návod

6.1 Referenční podmínky

Tabulka 6.1: Referenční podmínky pro stanovení absorbované dávky ve vodě pro Leksellův gama nůž [Tabulka 11 z TRS 483]

Materiál fantomu	Voda nebo plast (polystyren, ABS, Solid Water a další) ^a
Velikost fantomu	Polokoule na válcovém fantomu o průměru 16 cm
Typ komory	Mikro komora, cylindrická (uvedená v Tabulce 6.2)
Hloubka měření z_{ref}	Střed polokoule ^b
Referenční bod komory	Na centrální ose ve středu objemu dutiny
Umístění referenčního bodu	Ve středu polokoule
SSD (vzdálenost zdroj záření – povrch fantomu)	32 cm
Tvar a velikost pole f_{msr}	Kruhové pole, největší dostupné (průměr 1,6 nebo 1,8 cm) ^c

^aNejčastěji doporučovaným fantomem je polokoule umístěná buď na válcovém fantomu naplněném vodou nebo na válcovém fantomu z kompaktního polystyrenu.

^bV polystyrenových fantomech je to obvykle hloubka 8 cm, v PMMA fantomech je to hloubka 7 cm.

^cNejvětší dostupné pole závisí na typu ozařovače. Pro standardní typy ozařovače (Leksellův gama nůž 4 a 4C) je největší průměr 1,8 cm, pro Leksellův gama nůž Perfexion (PFX) je největší průměr 1,6 cm. Pro rotační systémy (RGS ozařovače) je největší průměr 1,8 cm. Msr pole je pole vytvořené se všemi zdroji v pozici out.

6.2 Stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Absorbovaná dávka ve vodě se stanoví dle vztahu (6.1):

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} \quad (6.1)$$

kde $D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je absorbovaná dávka ve vodě v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} v referenční hloubce z_{ref} ve vodě a za nepřítomnosti ionizační komory,

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ je odečet dozimetru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} obsahující součin korekčních faktorů na ovlivňující veličiny (tlak, teplota a vlhkost vzduchu, kalibrace elektrometru, polarizační jev a účinnost sběru náboje),

$N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}}$ je kalibrační koeficient pro veličinu absorbovaná dávka ve vodě pro ionizační komoru v konvenčním referenčním poli f_{ref} ve svazku referenční kvality Q_0 (většinou ^{60}Co),

$k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ je korekční faktor zohledňující rozdíly mezi odezvou detektoru v poli f_{ref} ve svazku kvality Q_0 a odezvou detektoru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} ,

přičemž f_{ref} je konvenční referenční pole, tj. homogenní pole o velikosti 10 cm x 10 cm, f_{msr} je tzv. machine specific reference field (viz Tabulka 6.1) a Q_{msr} je kvalita svazku f_{msr} pole.

Pokud je kalibračním svazkem svazek ^{60}Co , symbol pro korekční faktor pro kvalitu svazku $k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ se zjednodušuje na $k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}}$.

Poznámka: Korekční faktor $k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ v sobě již zahrnuje konverzi na absorbovanou dávku ve vodě, neboť referenční dozimetrie pro Leksellův gama nůž se obvykle provádí v plastových fantomech (ABS nebo SolidWater). Neaplikuje se tedy ani konverzní faktor na plast, ani se nepřepočítává hloubka měření.

Do vztahu (6.1) se pro použitou ionizační komoru, fantom a typ ozařovače (Perfexion nebo 4C) dosadí hodnota $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ z Tabulky 6.2.

Tabulka 6.2: Korekční faktory $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ ($= k_{Q_{msr}, Q_0}^{f_{msr}, f_{ref}}$) pro Leksellův gama nůž typu Perfexion a 4C

[Tabulka 14 z TRS 483]

Typ ionizační komory	Perfexion $f_{msr} = 16 \text{ mm } \varnothing$			4C $f_{msr} = 18 \text{ mm } \varnothing$		
	Solid Water	ABS	Water	Solid Water	ABS	Water
PTW T31010	1,0037	1,0146	1,0001	0,9958	0,9990	0,9924
PTW T31016	1,0040	1,0110	0,9991	1,0014	1,0025	0,9964
Exradin A1SL	1,0046	1,0138	1,0006	1,0009	1,0014	0,9967
Exradin A14SL	1,0154	1,0194	1,0112	1,0116	1,0060	1,0058
Exradin A16	1,0167	1,0295	1,0127	1,0163	1,0217	1,0104
IBA CC01	1,0213	1,0292	1,0169	1,0203	1,0208	1,0157
IBA CC04	1,0107	1,0117	1,0062	1,0086	1,0049	1,0040
Capintec PR05-P 4.7	1,0059	1,0070	1,0010	1,0007	0,9960	0,9951
Capintec PR05-P 7.6	1,0025	1,0126	0,9976	0,9885	0,9972	0,9844

6.3 Korekce na ovlivňující veličiny

Korekce na tlak, teplotu a vlhkost vzduchu se provádí postupem uvedeným v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.1.

Korekční faktor na tlak a teplotu k_{TP} se stanoví pomocí vzorce (6.2):

$$k_{TP} = \frac{(T + 273,15)}{(T_0 + 273,15)} \frac{P_0}{P} \quad (6.2)$$

Kde T je teplota vzduchu v dutině ionizační komory (v °C), P je tlak vzduchu v dutině ionizační komory (v kPa), T_0 a P_0 jsou referenční hodnoty teploty a tlaku, pro něž platí kalibrační koeficient ionizační komory. Referenční hodnoty tlaku, P_0 , a teploty, T_0 , jsou obvykle 101,3 kPa a 20 °C, ale v některých zemích je referenční teplota 22 °C. Referenční hodnoty teploty a tlaku pro použitou ionizační komoru jsou uvedeny v jejím kalibračním listu.

Oprava odezvy elektrometru se neaplikuje, pokud se ionizační komora a elektrometr kalibrují společně jako jedno měřící zařízení.

Korekční faktor na polaritu k_{pol} je dán vztahem (6.3):

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad (6.3)$$

kde M_+ je odečet elektrometru při kladné polaritě, M_- je odečet elektrometru při záporné polaritě a M je odečet elektrometru při polaritě běžně používané, která je stejná jako při kalibraci ionizační komory. V případě, kdy kalibrační laboratoř neaplikovala tuto korekci, se postupuje dle postupu uvedeného v doporučení TRS 398 v kapitole 4.4.3.3. Korekce na polaritu může být závislá na velikosti pole (kvůli ozáření různé délky kabelu), toto je třeba prošetřit.

Korekční faktor na rekombinaci iontů: Je-li záření kontinuální, jako v případě Leksellova gama nože, lze použít metodu dvojího napětí a opravu na sběr iontů vypočítat podle vztahu (6.4):

$$k_s = \frac{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - \left(\frac{M_1}{M_2}\right)} \quad (6.4)$$

Kalibrační list za referenčních podmínek vydaný kalibrační laboratoří má jasně vypovídat, jestli oprava na rekombinaci byla provedena, či nikoliv. Předcházející úvahy předpokládají, že kalibrační laboratoř provedla opravu na rekombinaci, a tudíž všechny uvedené postupy stanovení opravy k_s se vztahují pouze k rekombinaci v uživatelském svazku. Pokud je kalibrační svazek kontinuální, pak oprava bývá velmi blízká jedné a neprovedení této opravy při kalibraci bude mít většinou pouze zanedbatelný vliv.

6.4 Nejistota stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek

Při stanovování nejistoty absorbované dávky za referenčních podmínek lze pro Leksellův gama nůž vycházet z doporučení TRS 398 z Tabulky 11 (resp. 5.II) pro kobaltové ozařovače, plus je nutné přidat nejistotu korekčního faktoru $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ uvedeného v Tabulce 6.2. Hodnoty korekčních faktorů $k_{Q_{msr}}^{f_{msr}, f_{ref}}$ uvedených v Tabulce 6.2 představují sadu publikovaných dat bez uvedení jejich celkové nejistoty. V tomto doporučení se předpokládá odhad nejistoty tohoto korekčního faktoru 1% ($k = 1$) (potvrzeno fyzikem z Elekty Jonase Johanssonem).

Pro Leksellův gama nůž lze převzít většinu hodnot dílčích nejistot uvedených v Tabulce 11 (resp. 5.II) Je ale nutné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dávkového kalibračního koeficientu ionizační komory. A je vhodné uvažovat vlastní hodnotu nejistoty dlouhodobé stability uživatele referenčního dozimetrického řetězce.

Typická hodnota odhadu relativní standardní nejistoty stanovení absorbované dávky za referenčních podmínek pro svazky záření gama ^{60}Co uvedená v doporučení TRS 398 je 0,9% ($k = 1$). Za typickou hodnotu pro Leksellův gama nůž lze považovat hodnotu 1,3% ($k = 1$).

7 Příloha: Formalismus pro nestandardní pole – stručný popis

Absorbovaná dávka ve vodě za referenčních podmínek se dle TRS 398 stanoví dle vztahu:

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} \quad (7.1),$$

kde

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(s_{w,air})_Q (W_{air})_Q p_Q}{(s_{w,air})_{Q_0} (W_{air})_{Q_0} p_{Q_0}} \quad (7.2)$$

Nelze-li na daném ozařovači ustavit konvenční referenční pole a ostatní podmínky dle TRS 398, zavádí se **machine specific reference field** (f_{msr}) a postupuje se podle formalismu pro malá a nestandardní pole uvedeného v TRS 483 a představeného pro různé modalitty v jednotlivých kapitolách tohoto doporučení.

Pro msr dozimetrii platí, že pro stanovení absorbované dávky ve vodě v referenčním msr poli se použije ionizační komora. Vnější rozměry komory (vnější stěna komory) musí být vzdáleny minimálně o vzdálenost r_{LCPE} od hranice radiačního pole (50% absorbované dávky).

Absorbovaná dávka ve vodě v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} v referenční hloubce z_{ref} ve vodě a za nepřítomnosti ionizační komory se stanoví dle vztahu:

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} \quad (7.3)$$

přičemž korekční faktor zohledňující rozdíly mezi odezvou detektoru v poli f_{ref} ve svazku kvality Q_0 a odezvou detektoru v poli f_{msr} ve svazku kvality Q_{msr} lze vyjádřit vztahem:

$$k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} = k_{Q,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q}^{f_{msr},f_{ref}} \quad (7.4)$$

kde Q je kvalita hypotetického referenčního pole 10 cm x 10 cm (tj. jaká by byla kvalita konvenčního referenčního pole pro danou modalitu, kde ale konvenční referenční pole nelze nastavit pro měření). Stanoví se např. dle vztahu Palmanse (3.1).

Druhý člen v rovnici (7.4) se s ohledem na jeho nejistotu pokládá roven 1. Vztah (7.3) lze pak vyjádřit:

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q,Q_0}^{f_{ref}} \quad (7.5)$$

Pro WFF svazky se koeficienty $k_{Q,Q_0}^{f_{ref}} = k_Q^{f_{ref}}$ pro kalibraci v ^{60}Co vyhledají v Tabulce 12 TRS 483 (přičemž odpovídají koeficientům k_{Q,Q_0} ze vztahu (7.1)).

Pro FFF svazky se koeficienty $k_Q^{f_{ref}}$ vyhledají v Tabulce 13 TRS 483. Zahrnují opravu na rozdílnost spekter a objemový efekt ionizačních komor ve FFF svazku:

$$k_{Q_{msr}}^{f_{msr},f_{ref}} = k_Q^{f_{ref}} (Tab 13) = k_Q^{f_{ref}} (Tab 12) s_{w,air}^{FFF,WFF} (k_{vol})_Q^{f_{ref}} \quad (7.6)$$

kde $k_Q^{f_{ref}}$ (Tab 13) je koeficient $k_Q^{f_{ref}}$ odečtený z Tabulky 13 TRS 483, $k_Q^{f_{ref}}$ (Tab 12) je koeficient $k_Q^{f_{ref}}$ odečtený z Tabulky 12 TRS 483, $s_{w,air}^{FFF,WFF}$ je uveden v Tabulce 30 TRS 483 a $(k_{vol})_Q^{f_{ref}}$ je uveden v Tabulce 32 TRS 483.

Popis symbolů použitých v této kapitole je uveden v TRS 483 a v TRS 398.

8 Literatura

- [1] TRS 483 Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy, An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination (IAEA 2017), [v textu značeno TRS 483].
- [2] TRS 398 Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water (IAEA 2000. resp. revize 2006), [v textu značeno TRS 398].
- [3] AAPM TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams (1999).
- [4] Weinhou, M.S., Meli, J.A. Determining P_{ion} , the correction factor for recombination losses in an ionization chamber, Med. Phys. 11 (1984) 846–849.

Vypracovali: Ing. Dufek, Ing. Horáková, Ing. Koniarová