

Informace k novým operačním veličinám pro externí ozáření

Mezinárodní komise pro radiační jednotky a měření (ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements) vydala v roce 2020 publikaci [ICRU Report 95](#), kde je prezentován revidovaný systém operačních veličin pro externí ozáření. Použití těchto nových veličin zatím není v radiační ochraně vyžadováno, ale požadavek jejich zavedení do praxe je lze očekávat po roce 2030, až budou připraveny technické a legislativní podmínky.

Informace k systému nových operačních veličin a doporučení k přípravě na přechod k novým veličinám v oblasti dozimetrie byly zpracovány v rámci řešení projektu Bezpečnostního výzkumu MV (VI20192022156) „Dozimetrie pro radiační nehody a incidenty v kontextu nových operačních veličin pro externí záření“.

Důvody změny systému operačních veličin

Současně používané operační veličiny (ICRU, 1985; ICRU, 1988; ICRU, 1992) neposkytují optimální odhad neměřitelných veličin radiační ochrany (ICRP, 2007) v širokém rozsahu energií záření. Příkladem může být měření v diagnostických fotonových polích (30- 100 keV), kdy dochází k systematickému nadhodnocování efektivní dávky, což může vést k zavedení zbytečných opatření pro lékařský personál. Opačný problém nastává při měření vysokoenergetických neutronů (> 30 MeV), kdy je operační veličina nižší než veličina radiační ochrany. ICRU ve spolupráci s ICRP přikročila k inovaci systému operačních veličin používaných pro měření v radiologické ochraně, který je prezentován v publikaci **ICRU Report 95** Operational Quantities for External Radiation Exposure (ICRU, 2020). Nově jsou zde operační veličiny definovány jako součin fluence a příslušného konverzního koeficientu a jsou založené na veličinách radiační ochrany- efektivní dávce a dávce absorbované v zájmovém orgánu. Ve výpočetních modelech založených na Monte Carlo simulaci použitých ke stanovení těchto konverzních koeficientů byly zahrnuty stejné fantomy jako použité pro stanovení veličin radiační ochrany, což přináší vzájemné přiblížení operačních veličin a veličin radiační ochrany. Zároveň byly nové konverzní koeficienty vypočítané pro větší množství druhů záření a širší rozpětí energií tak, aby byla zahrnutá i nová pole záření, ve kterých se mohou osoby vyskytovat, např. v okolí urychlovačů částic.

Nové veličiny zatím nejsou zavedeny do praxe. Počítá se s postupným zaváděním tak, aby byl dostatečný prostor pro legislativní a také praktickou přípravu změn pro výrobce přístrojů, dozimetrické služby i kalibrační laboratoře, týkajících se jak samotných přístrojů, tak souvisejících dokumentů. Zavedení nových operačních veličin se předpokládá po roce 2030.

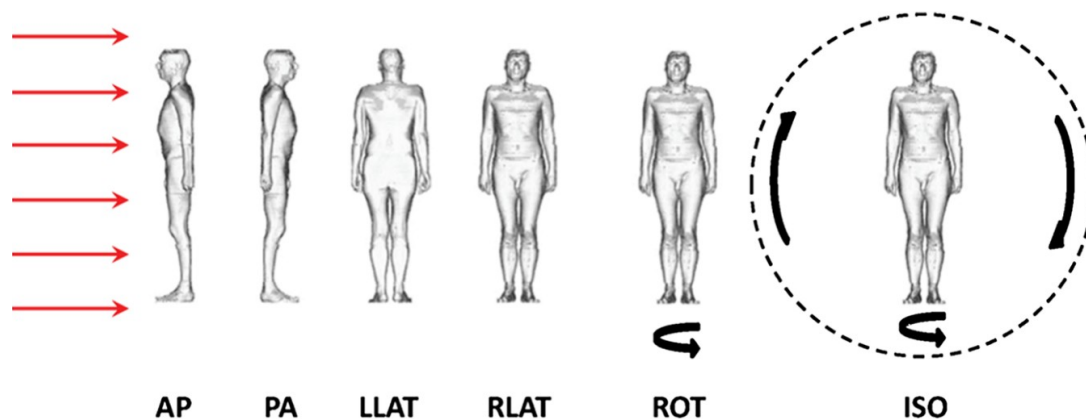
Nové operační veličiny

Obecně jsou nové operační veličiny definovány jako součin fyzikální veličiny popisující pole záření a konverzního koeficientu. Fyzikální veličinou, ke které se konverzní koeficienty vztahují, je fluence částic ϕ , v případě fotonů také kerma ve vzduchu K_a . Nově navržené operační veličiny pak mají podobu $H = \phi \cdot h$, případně $H = K_a \cdot h_k$.

Nové operační veličiny pro osobní monitorování

Osobní dávka (H_p)

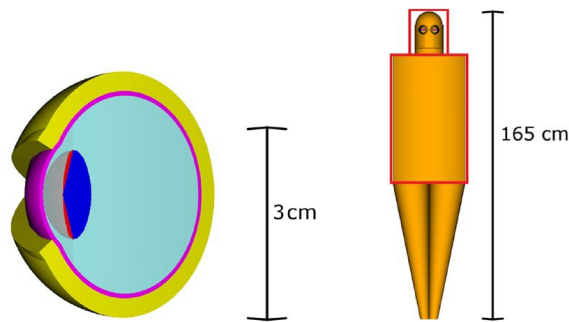
$H_p = \phi \cdot h_p$, kde ϕ značí fluenci částic a h_p konverzní koeficient, který je stanoven jako $h_p(E_p, \Omega) = E(E_p, \Omega) / \phi(E_p, \Omega)$, kde $E(E_p, \Omega)$ je efektivní dávka pro částice s kinetickou energií E_p dopadající ve směru Ω , která byla vypočtena pro ICRP/ICRU fantom referenčního člověka (ICRP, 2009) a $\phi(E_p, \Omega)$ je fluence částic pro danou energii a směr dopadu. Konverzní koeficienty byly stanoveny pro $\Omega = 0^\circ$ s krokem 15° a pro základní geometrie ozáření, které jsou předozadní (AP) 0° , zadopřední (PA) 180° , rotační (ROT), boční (RLAT, LLAT) $\pm 90^\circ$, izotropní (ISO), viz obr. 1. Jednotkou H_p je sievert (Sv) o rozměru J/kg.



Obr. 1. Základní geometrie ozáření (ICRU, 2020)

Osobní absorbovaná dávka v oční čočce ($D_{p\text{ lens}}$)

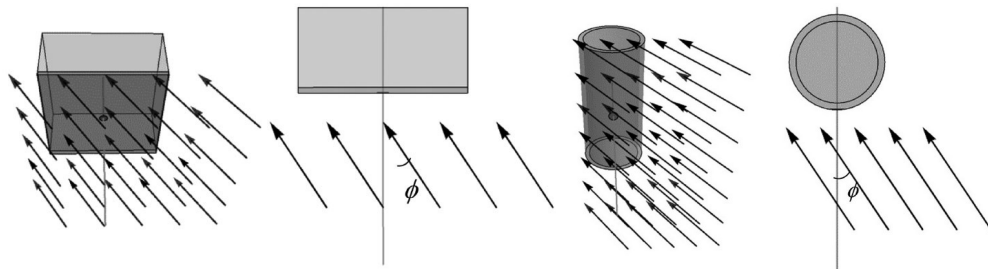
$D_{p\text{ lens}} = \Phi \cdot d_{p\text{ lens}}$, kde Φ je fluence částic a $d_{p\text{ lens}}$ konverzní koeficient stanovený jako $d_{p\text{ lens}}(E_p, \Omega) = D_{p\text{ lens}}(E_p, \Omega) / \Phi(E_p, \Omega)$, kde hodnota byla stanovena pomocí očního modelu (Behrens, 2017) při uvážení celotělového ozáření částicemi o energii E_p dopadajících ve směru Ω , viz obr. 2. Pro daný úhel se bere maximální hodnota dávky absorbované v oční čočce pravého nebo levého oka. Jednotkou $D_{p\text{ lens}}$ je gray (Gy) o rozměru J/kg.



Obr. 2. Model oka v celotělovém fantomu, který byl použitý pro výpočet dávky v oční čočce (ICRU, 2020)

Osobní absorbovaná dávka v místní kůži ($D_{p\text{ local skin}}$)

$D_{p\text{ local skin}} = \Phi \cdot d_{p\text{ local skin}}$, přičemž Φ je fluence částic a $d_{p\text{ local skin}}$ konverzní koeficient $d_{p\text{ local skin}}(E_p, \Omega) = D_{p\text{ local skin}}(E_p, \Omega) / \Phi(E_p, \Omega)$, kde pro výpočet byly použity patřičné fantomy- deska s vrstvou kůže simulující trup, sloup simulující končetiny, tyčka simulující prsty (ICRU, 2020) pro částice o energii E_p dopadajících ve směru Ω , viz. obr. 3. Jednotkou $D_{p\text{ local skin}}$ je gray (Gy) o rozměru J/kg.



Obr. 3. Deskový a cylindrický fantom použitý pro výpočet dávky absorbované v kůži (ICRU, 2020)

Nové operační veličiny pro monitorování prostředí

Prostorová dávka (H^*)

$H^* = \Phi \cdot h_{E_{\max}}$, kde Φ značí fluenci částic a $h_{E_{\max}}$ konverzní koeficient stanovený jako $h_{E_{\max}}(E_p) = E_{\max}(E_p) / \Phi(E_p)$, $E_{\max}(E_p)$ představuje maximální efektivní dávku při uvážení geometrií ozáření AP, PA, RLAT, LLAT, ROT, ISO, $\Phi(E_p)$ je fluence částic o energii E_p . Jednotkou H^* je sievert (Sv) o rozměru J/kg.

Směrová absorbovaná dávka v oční čočce (D'_{lens})

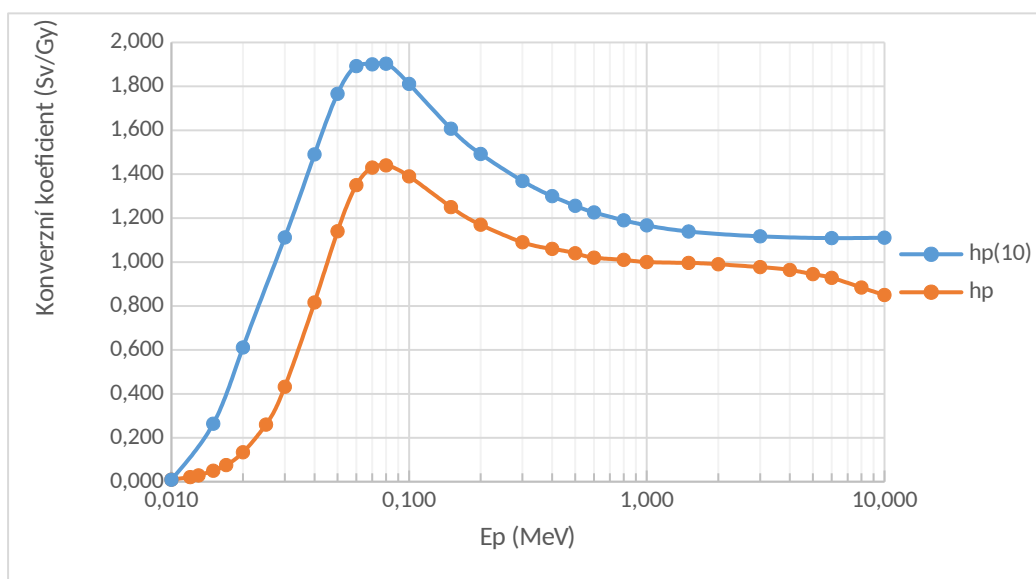
$D'_{\text{lens}} = \Phi \cdot d'_{\text{lens}}$, kde Φ je fluence částic a d'_{lens} byl stanoven pomocí očního modelu (Behrens, 2017) při uvážení celotělového ozáření částicemi o energii E_p dopadajících ve směru Ω . Pro daný úhel se bere maximální hodnota dávky absorbované v oční čočce pravého nebo levého oka. Jednotkou D'_{lens} je gray (Gy) o rozměru J/kg.

Směrová absorbovaná dávka v místní kůži ($D'_{\text{local skin}}$)

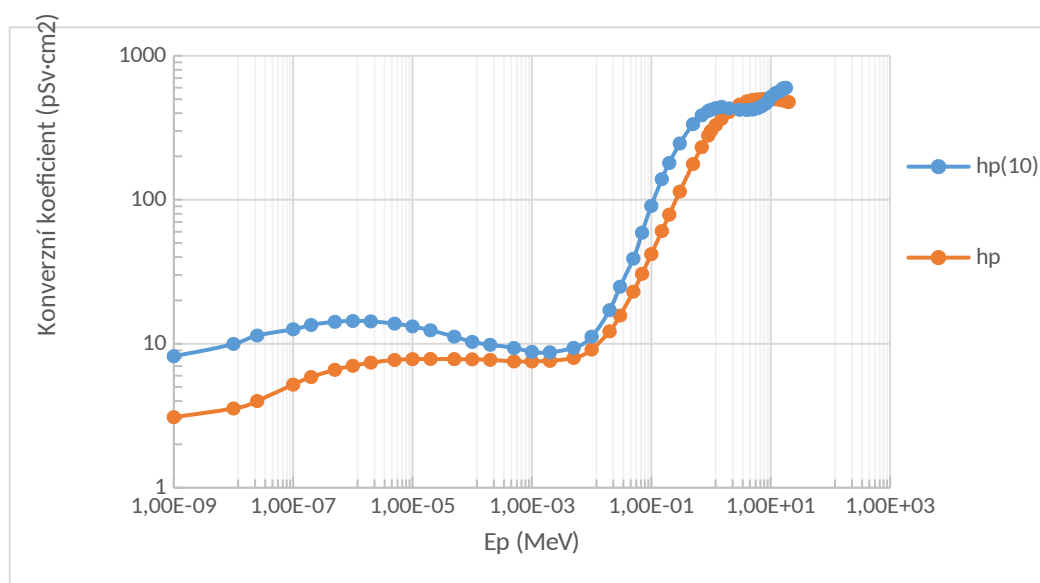
$D'_{\text{local skin}} = \Phi \cdot d'_{\text{local skin}}$, kde Φ je fluence částic a $d'_{\text{local skin}}$ byl stanoven pomocí desky ICRU (ICRU, 2020) pro ozáření částicemi o energii E_p dopadajících ve směru Ω . Jednotkou $D'_{\text{local skin}}$ je gray (Gy) o rozměru J/kg.

Rozdíly mezi operačními veličinami

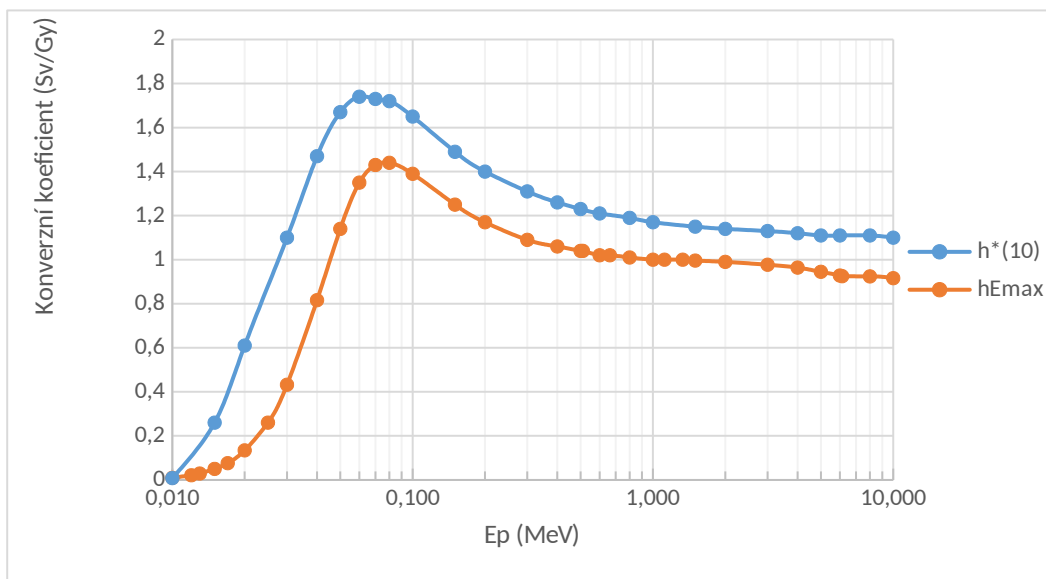
Rozdíly mezi operačními veličinami jsou dány rozdíly mezi novými a původními konverzními koeficienty pro převod fyzikální veličiny na operační veličinu. Pro výpočty těchto koeficientů byly původně použité geometrické fantomy nahrazeny antropomorfními, které lépe odpovídají lidskému tělu. Vzájemné rozdíly jsou dobře patrné při grafickém znázornění v obrázcích 4-13, kde jsou hodnoty konverzních koeficientů uvedené pro monoenergetická spektra dopadající v AP geometrii.



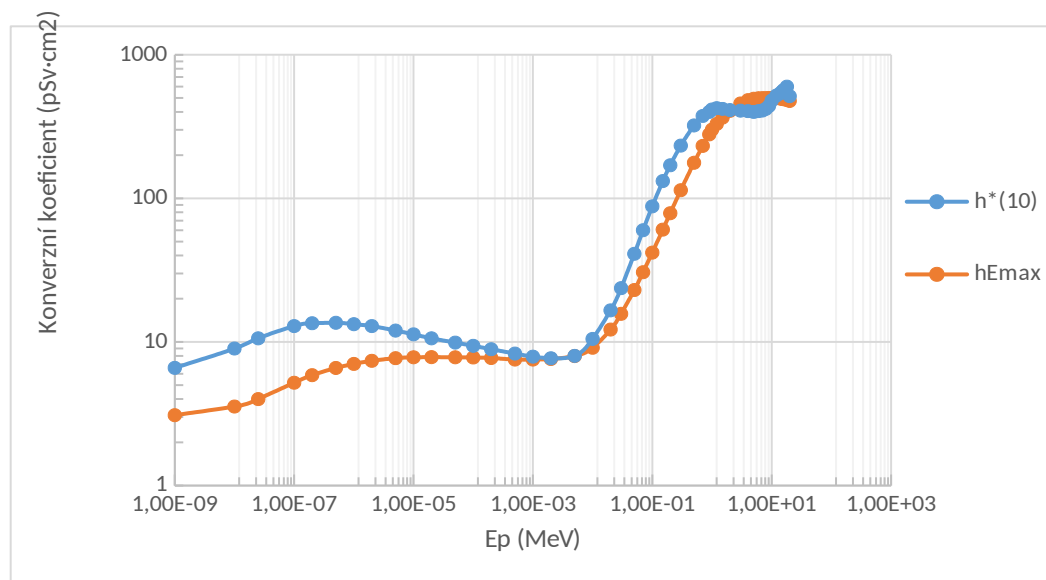
Obr. 4. Konverzní koeficienty $h_p(10)$ a h_p (vzhledem ke K_a) veličin $H_p(10)$ a H_p pro fotony v rozsahu energií od 10 keV do 10 MeV pro ozáření v AP geometrii



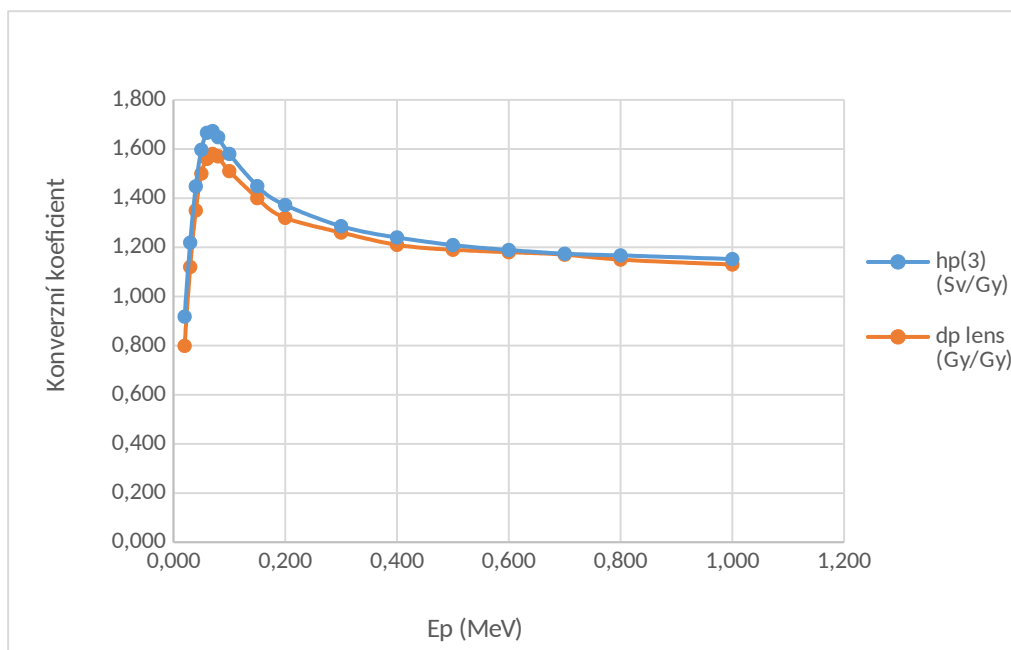
Obr. 5. Konverzní koeficienty $h_p(10)$ a h_p (vzhledem k Φ) veličin $H_p(10)$ a H_p pro neutrony v rozsahu energií od 10^{-9} MeV do 20 MeV pro ozáření v AP geometrii



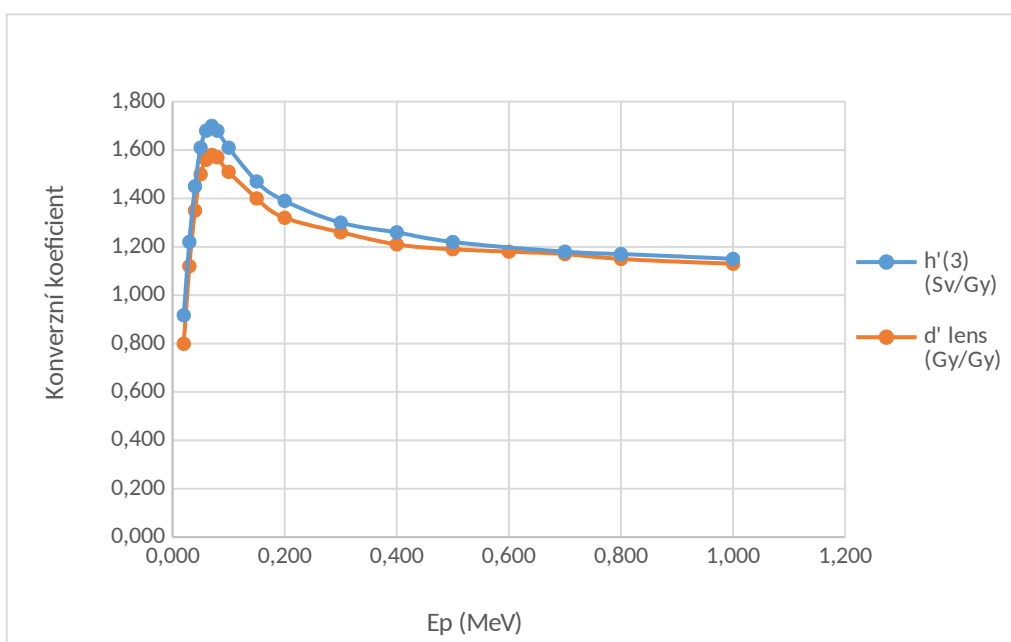
Obr. 6. Konverzní koeficienty $h^*(10)$ a h_{Emax} (vzhledem ke K_a) veličin $H^*(10)$ a H^* pro fotony v rozsahu energií od 10 keV do 10 MeV



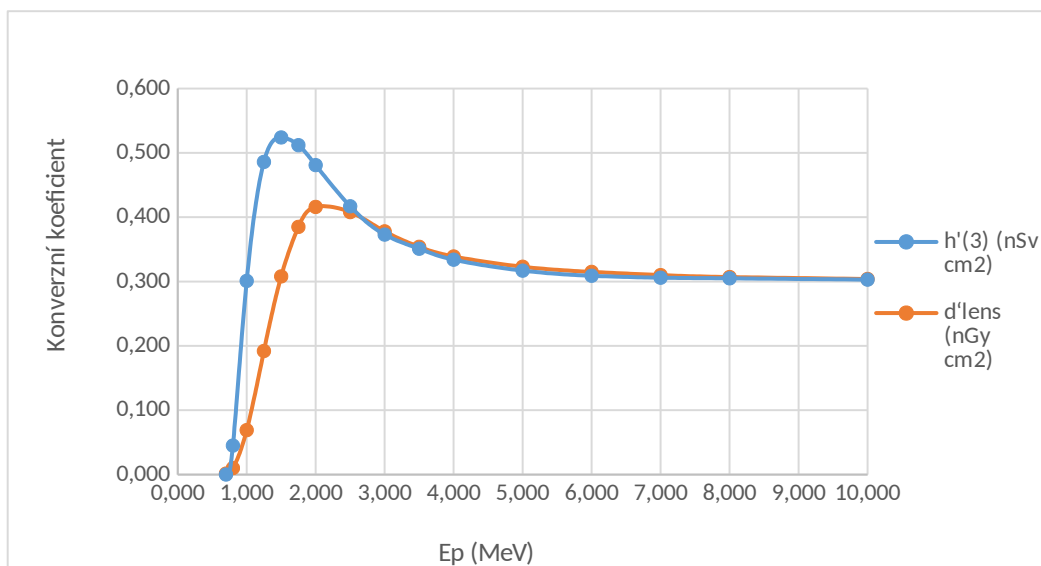
Obr. 7. Konverzní koeficienty $h^*(10)$ a h_{Emax} (vzhledem k Φ) veličin $H^*(10)$ a H^* pro neutrony v rozsahu energií od 10^{-9} MeV do 20 MeV



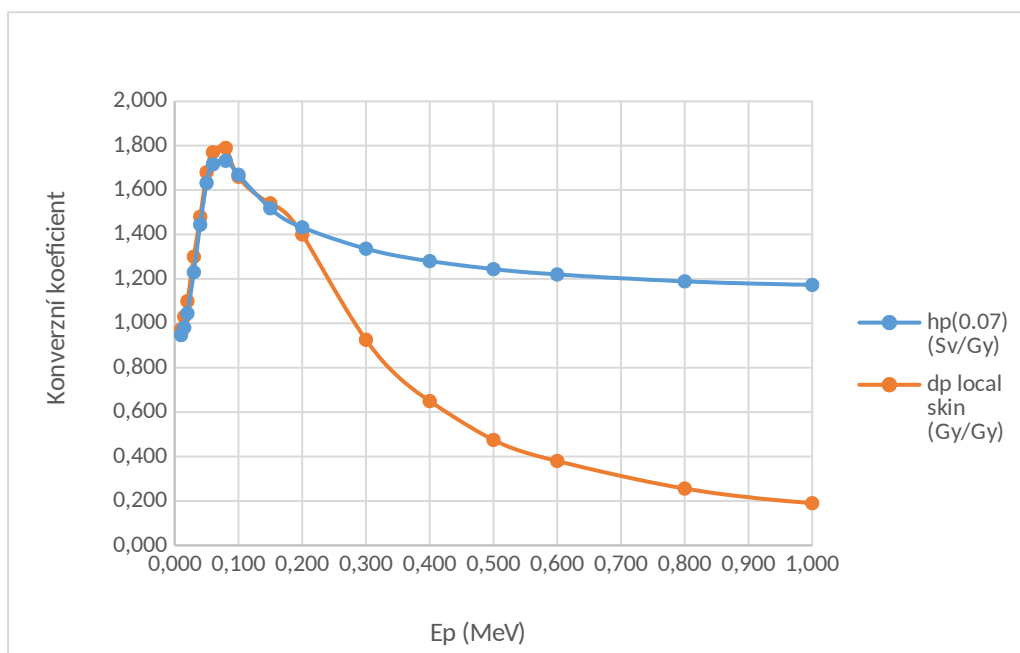
Obr. 8. Konverzní koeficienty $h_p(3)$ a $d_{p \text{ lens}}$ (vzhledem ke K_a) veličin $H_p(3)$ a $D_{p \text{ lens}}$ pro fotony v rozsahu energií od 20 keV do 1 MeV pro ozáření v AP geometrii



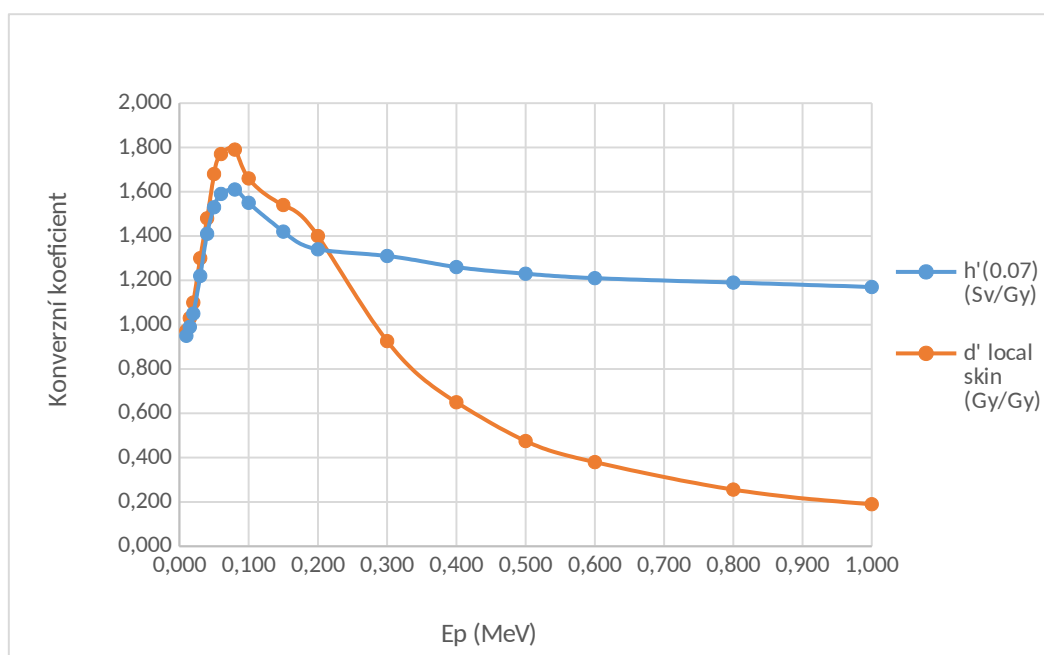
Obr. 9. Konverzní koeficienty $h'(3)$ a d'_{lens} (vzhledem ke K_a) veličin $H'(3)$ a D'_{lens} pro fotony v rozsahu energií od 20 keV do 1 MeV pro ozáření v AP geometrii



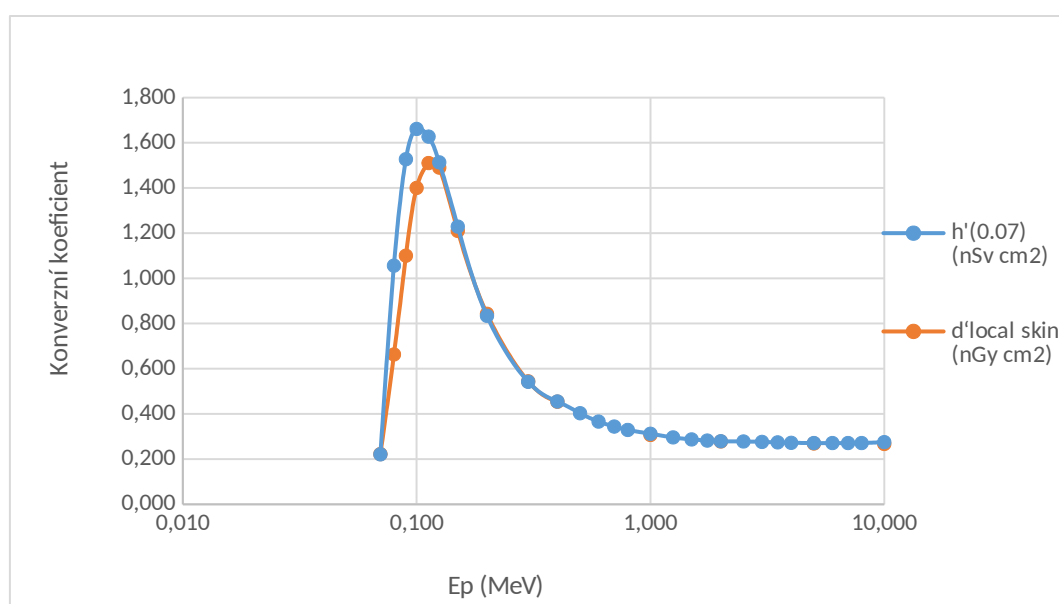
Obr. 10. Konverzní koeficienty $h'(3)$ a d'_{lens} (vzhledem k Φ) veličin $H'(3)$ a D'_{lens} pro elektrony v rozsahu energií od 700 keV do 10 MeV pro ozáření v AP geometrii



Obr. 11. Konverzní koeficienty $h_p(0.07)$ a $d_{p \text{ local skin}}$ (vzhledem ke K_a) veličin $H_p(0.07)$ a $D_{p \text{ local skin}}$ pro fotony v rozsahu energií od 10 keV do 1 MeV pro ozáření v AP geometrii



Obr. 12. Konverzní koeficienty $h'(0.07)$ a $d'_{\text{local skin}}$ (vzhledem ke K_a) veličin $H'(0.07)$ a $D'_{\text{local skin}}$ pro fotony v rozsahu energií od 10 keV do 1 MeV pro ozáření v AP geometrii



Obr. 13. Konverzní koeficienty $h'(0.07)$ a $d'_{\text{local skin}}$ (vzhledem k Φ) veličin $H'(0.07)$ a $D'_{\text{local skin}}$ pro elektrony v rozsahu energií od 70 keV do 10 MeV pro ozáření v AP geometrii

Konverzní koeficienty vystihují energetickou a směrovou závislost operačních veličin. Z obr. 4- 13 jsou tak patrné vzájemné rozdíly mezi původními a novými veličinami v AP geometrii. V praxi je zásadní otázkou, jak dobře mohou současně používané dozimetry sloužit pro měření nových veličin. Lze předpokládat, že fotonové dozimetry úspěšně optimalizované pro měření $H_p(10)$ a $H^*(10)$ budou nejvíce nadhodnocovat měření H_p a H^* pro nižší energie fotonů (do cca 300 keV). Problém se tak týká zejména pracovišť s umělými zdroji záření, typicky lékařských pracovišť, kde je vysoký podíl záření rozptýleného od pacienta. Předpoklad byl potvrzen také v experimentální studii, kdy bylo nadhodnocení odezvy v oblasti nízkenergetických fotonů nejvíce patrné v AP geometrii u osobních dozimetrů výrobcem kalibrovaných v $H_p(10)$ (Ekendahl et al., 2020). Některé dozimetry prostředí jsou optimalizované výhradně pro měření fotonů vyšších energií, které se obvykle vyskytují v přírodním radiačním pozadí, a fotony nízkých energií podhodnocují. V takových

případech by pak jejich odezva mohla lépe vyhovovat nové veličině H^* (Čemusová et al., 2022). Před použitím pro měření nových operačních veličin je však potřeba prostudovat odezvu daného detektoru v širokém energetickém rozpětí a znát jeho chování při použití v polích fotonů s nižšími energiemi. U dozimetrů, jejichž kalibraci provádí uživatel, lze dosáhnout stejné odezvy při měření nové veličiny v polích fotonů vyšších energií jako u původní veličiny. Při detekci fotonů s energií pár desítek keV (< 50 keV) přetrvává pro měření v AP geometrii nadhodnocení díky rozdílu mezi původními a novými veličinami. V případě osobních vícesložkových dozimetrů by tak bylo žádoucí provést úpravu filtrů dozimetru nebo výpočetního algoritmu. Správnost odezvy neutronových dozimetrů se liší v závislosti na konkrétním spektru a geometrii (Tanner et al., 2018; Čemusová et al., 2022). Problém může být s detekcí termálních neutronů, u kterých je zároveň relativně největší rozdíl mezi původní a novou operační veličinou. Slabá odezva v původní veličině může znamenat zlepšení při měření nové veličiny. Naopak v případech, kdy došlo k nadhodnocení původní veličiny, bude docházet k ještě významnějšímu nadhodnocení nové veličiny.

U veličin pro odhad dávky na kůži a oční čočku nejsou při nejčastějších expozičních podmínkách tak velké rozdíly mezi původní a novou veličinou. Bylo zjištěno, že aktivní dozimetry, které měří správně $H_p(0.07)$, budou správně měřit také $D_{p, \text{local skin}}$ a to alespoň pro fotony do 200 keV, což souvisí s podobnými hodnotami konverzních koeficientů pro původní a nové operační veličiny (Ekendahl et al., 2020). U vícesložkových pasivních dozimetrů může být problémem podhodnocení nové veličiny odhadující dávku na kůži už od nízkých energií fotonů a pro optimalizaci by tak byla vyžadována úprava výpočetního algoritmu.

Doporučení k přípravě na přechod na nové veličiny

Přechod na měření nových operačních veličin u dozimetrů, jejichž kalibraci zavádí uživatel, bude snáze proveditelný pro dozimetry prostředí operující v polích fotonů s vyššími energiemi. U vícesložkových celotělových osobních dozimetrů by však pro optimalizaci měření nových veličin v širokém rozpětí energií byla potřebná úprava vyhodnocovacího algoritmu případně úprava filtrů v obalu dozimetru. Podobně u aktivních dozimetrů bude zapotřebí, aby změnu kalibrace a případně také konstrukce dozimetru provedl výrobce. U dozimetrů prostředí detekujících fotony od 50 keV výše může být postačující překalibrování velikosti odezvy v kalibračním poli. Jako dočasnou možnost lze zvážit použití opravného faktoru stanoveného jako poměr mezi konverzním koeficientem nové a původní veličiny pro dané spektrum záření. Uživatel by však měl vzít v úvahu také chování konkrétního přístroje v různých polích. Pro tyto účely lze využít **služeb akreditované kalibrační laboratoře SÚRO**, která poskytuje kalibraci pomocí rentgenových svazků a radionuklidových zdrojů ^{137}Cs a ^{60}Co . Způsob kalibrace dozimetrů pro měření nových operačních veličin zůstane stejný jako u původních veličin. Kalibrace dozimetrů prostředí probíhá volně ve vzduchu. Osobní dozimetry jsou kalibrovány na speciálních fantomech v závislosti na veličině a typu dozimetru (ISO, 2019; ICRU, 2020). Rozdílná bude hodnota použitého konverzního koeficientu vztahujícího se k původní nebo nové operační veličině. Konverzní koeficienty (vzhledem ke K_a) původních veličin pro referenční fotonová spektra jsou publikované v normě ISO 4037-3 a pro nové veličiny v publikaci Behrens a Otto (2022) (ISO, 2019; Behrens a Otto, 2022). Přechod na nové veličiny bude představovat pro řadu výrobců složitý proces spočívající v úpravě designu dozimetrů tak, aby jejich odezva odpovídala nové veličině v širokém intervalu úhlů a energií záření, a v následném testování a zavedení vhodné kalibrace přístrojů. Přípravy na změnu operačních veličin jsou tak již aktuální.

Nové veličiny mají sloužit ke správnějšímu odhadu veličin radiační ochrany, bude tak potřeba zavést změny také do příslušných dokumentů týkajících se požadavků na správnost měření. Zohlednění nových veličin se týká řady dokumentů v rámci jednotlivých států, od zákonů přes prováděcí předpisy a doporučení až po metodické postupy zejména kalibračních laboratoří a dozimetrických služeb. Po zavedení nových veličin do praxe dojde pravděpodobně u většiny radiačních pracovníků

k určitému snížení zaznamenaných hodnot dávky, přestože velikost ozáření se nezmění. Pro objasnění této skutečnosti by bylo vhodné uspořádat školení pro zaměstnance kontrolních úřadů, osoby zajišťující dohled nad radiační ochranou na pracovištích, zaměstnance dozimetrických služeb i samotné radiační pracovníky.

Další důsledky v souvislosti se zavedením nového systému operačních veličin a praktická doporučení pro přípravu na tuto změnu lze nalézt v publikaci (Gilvin et al., 2022).

Reference

Behrens, R., 2017. Compilation of conversion coefficients for the dose to the lens of the eye. Radiat. Prot. Dosim. 174, 348-370.

Behrens, R. a Otto, T., 2022. Conversion coefficients from total air kerma to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for photon reference radiation qualities. J. Radiol. Prot. 42. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abc860>

Čemusová, Z. et al., 2022. Response of current area dosimeters to new operational quantities. Radiat. Prot. Dosim. 198, 1313-1321.

Ekendahl, D. et al., 2020. Response of current photon personal dosimeters to new operational quantities. Radiat. Prot. Dosim. 190, 45-57.

Gilvin, P. et al., 2022. Evaluation of the Impact of the New ICRU Operational Quantities and Recommendations for their Practical Application. EURADOS Report 2022-2. EURADOS.

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37.

ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39.

ICRU, 1985. Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources. ICRU Report 39.

ICRU, 1988. Determination of dose equivalents from external radiation sources- part 2. ICRU Report 43.

ICRU, 1992. Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations. ICRU Report 47.

ICRU, 2020. Operational quantities for external radiation exposure. ICRU Report 95.

ISO, 2019. Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. Standard ISO 4037-3. ISO, Geneva.

Tanner, R.J. et al., 2018. The response of the PHE neutron personal dosimeter in terms of the proposed ICRU personal dose equivalent. Radiat. Prot. Dosim. 180, 17-20.