

621.378.33.613.648:355.1(437)

NĚKTERÉ HYGIENICKÉ PROBLÉMY PRÁCE S LASERY V ČSLA

Plk. MUDr. Jaromír SKALICKÝ, CSc.

Vojenský ústav hygieny, epidemiologie a mikrobiologie v Praze

(náčelník: plk. MUDr. Vladimír Kotlář, CSc.)

Výraz „laser“ byl utvořen ze začátečních písmen věty charakterizující princip vzniku tohoto záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). V definici hygie-

nického předpisu MZd ČSR sv. 53/1982 znamená laser kvantový generátor elektromagnetického záření, u něhož se vlnová délka záření pohybuje v rozmezí 200 až 13 000 nm.

Světlo produkované laserovým generátorem se liší od běžného světla v tom, že fotony se uvolňují z generátoru naráz a o stejné vlnové délce; toto světlo je tedy monochromatické a koherentní — má prakticky stejnou frekvenci, fázi, amplitudu i směr. Světelné vlny jsou perfektně prostorově sevřené a soudržné.

Energie záření laseru působí na zasažené tkáně lidského těla, jimiž proniká; projevy ozáření jsou především tepelné, fotochemické a mechanické. Struktury, které zářivou energii s ohledem na vlnovou délku absorbují, se v různé míře zahřívají v závislosti na hustotě toku energie a době trvání. Fotochemická reakce se uplatňuje především v buňkách epitelů při vlnových délkách záření laseru v oblasti ultrafialového (UV) světla. Zářivá energie laseru při nárazu na tkáň působí částí své energie její mechanické stlačení, při větších hustotách toku energie pak různě vyznačené trhlinky a jiné destrukce. Mechanické účinky se spojují a potencují s účinky tepelnými. Míra ohrožení a případně stupeň poškození tkání a orgánů lidského těla odvisí od řady faktorů, o nichž se dále postupně zmíníme.

Vlnová délka záření

Všechny vlnové délky záření laseru mají v závislosti na hustotě toku energie, vlastnostech zasažené tkáně, době ozařování různě vyznačené biologické účinky — ať již jde o oblast UV světla (vlnová délka 200 až 400 nm), oblast světla viditelného (vlnová délka 400 až 700 nm), nebo infračervené světlo (IR) v oblasti vlnových délek 700 až 1400 nm (oblast A), 1400 až 3000 nm (oblast B) a 3000 až 13 000 nm (část oblasti C). Světlo, resp. energie záření laseru při vlnové délce 315 až 400 nm (UV oblast A) proniká až do čočky a sítnice již není tangována, naproti tomu pro sítnici oka jsou nebezpečné paprsky o vlnových délkách 400 až 1400 nm. Záření ostatních zmíněných délek je zachyceno v rohovce a do hlubších struktur oka neproniká.

Odraz, průnik a absorpce zářivé energie v tkáních

Část zářivé energie se odráží od povrchu zasažené tkáně těla zpět do prostoru, část je absorbována buňkami především v povrchových vrstvách tkáně, zbytek je předán po průniku povrchovými vrstvami v buňkách hlubších vrstev. Průnik a absorpce zářivé energie v tkáních úzce souvisí s vlnovou délkou zářivé energie. Např. při vlnové délce záření 550 nm (k níž je lidské oko nejcitlivější) k sítnici proniká asi 80 % vyslané hustoty toku energie, která dopadla na povrch rohovky odpovídající aktuální ploše duhovky. Při kratších i delších vlnových délkách záření (v rozmezí 400 až 1400 nm) proniká k sítnici podstatně nižší podíl energie záření; např. při vlnové délce záření 1063 nm, jaké vysílá většina laserových dálkoměrů, pro-

niká k sítnici 8 až 12 % energie ze svazku paprsků vymezeného aktuální plochou pupily oka. Absorpce energie záření v buňkách sítnice a přilehlých tkáních bulbu očního je doprovázena vzestupem teploty a destrukcemi buněk a tkání, odstupňovanými podle dosaženého přehřátí.

Chudě pigmentovaná lidská pokožka odráží až 45 % z příkonu fluence energie záření v pásmu viditelného světla, silně pigmentovaná pokožka odráží pouze kolem 10 %. V pásmech A UV světla (vlnová délka 315 až 400 nm) a IR světla (vlnová délka 700 až 1400 nm) je odráženo jen asi 5 % z příkonu fluence energie záření a zbytek je absorbován především v povrchových vrstvách pokožky, a to tím blíže povrchu, čím větší je vlnová délka záření.

Zářivá energie, hustota toku energie

Zářivá energie vysílaná laserem (ve spojitém režimu nebo v impulsích) se vyjadřuje v joulech ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$), hustota toku energie ve wattech ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$). Ohrožení pokožky nadměrným zahříváním počíná při kontinuálním působení záření laseru s výkonem $0,1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Při impulsním režimu generování laserového záření záleží na době trvání impulsů, opakovacím kmitočtu a vlnové délce záření; zhodnocení se provede podle tabulek. Nejvyšší přípustné hodnoty zářivé energie a hustoty toku energie s ohledem na možnost zasažení lidského oka a ohrožení zraku jsou stanoveny v tabulkách hygienického předpisu MZd ČSR sv. 53/1982. Be-rou zřetel na vlnovou délku záření, dobu trvání emise záření a na průměr limitního otvoru (stav pupily).

Doba trvání emise záření

Příkon fluence částic záření lze chápat jako součin hustoty toku energie ve $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ a doby jejího působení na tkáň v s^{-1} . Z toho plyne, že doba ozařování tkáně je rozhodujícím činitelem pro odhad důsledků a pro stanovení norem přípustných hodnot.

Velikost ozářené plochy

Čím je ozařovaná plocha kůže lidského těla větší, tím může absorbovat beze škod celkově větší množství energie záření v důsledku lepších možností ochlazování tkání cévním řečištěm. Zatímco nadměrné zahřívání pokožky začíná při kontinuální hustotě toku energie $0,1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, lze ozařovat větší plochy kůže energií $0,01 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ bez omezení; na 1 m^2 povrchu těla může tedy působit beze škody kontinuálně energie záření laseru s hustotou toku $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Postavení zornice lidského oka

Při hodnocení možných účinků laseru na lidské oko, resp. na jeho sítnici, je nutno brát

v úvahu aktuální postavení jeho zornice. Při plné adaptaci na šero má zornice lidského oka průměr 7 mm a plochu 0,38 cm²; při plném denním osvětlení se průměr zornice zmenšuje až na 1 mm a její plocha na 0,0157 cm², tedy přibližně 25krát. Tyto okolnosti mají svůj význam při hodnocení možného rizika od laserů emitujících záření ve vlnových oblastech 400 až 1400 nm, kde část zářivé energie, která zasáhla oko, je absorbována až v sítnici a jejím bezprostředním okolí. Toto nebezpečí je nutno brát v úvahu především u laserů operujících ve volném terénu v noci.

Zasažená oblast sítnice oka

Fovea v centru macula lutea má s ohledem na největší nakupení tyčinek rozhodující význam pro černobílé vidění a zaostřování zraku. Její poškození zářením laseru může proto způsobit významné poškození zraku, zatímco paprsky se stejnou hustotou toku energie při promítnutí na periferní část sítnice mohou být pro výsledné zrakové vnímání nevýznamné. Centrování světla na foveu znamená zesílení jeho skutečné intenzity až 100 000krát, z čehož plyne vysoké nebezpečí zvláště impulsního záblesku laseru pro oko, které je zaostřeno na místo, kde je laser situován.

Minimální retinální reakce je mírné zvýšení prokrvení sítnice, které se projeví po několika minutách až hodinách po zásahu oka zářením laseru o vlnových délkách, které k sítnici proniká; tato reakce se při očním vyšetření hodnotí jako hrozící retinální léze. S rostoucím množstvím energie absorbované v sítnici a jejím bezprostředním okolí roste velikost silněji prokrvené oblasti sítnice, její prosáknutí, výskyt krvácení a ruptur. Jako minimální retinální léze se uvádí změna na očním pozadí, která přetrvává jako bílá skvrnka po několika dnech a pak se revaskularizuje.

Pro hygienické posouzení rizika práce s laserem je důležitá také znalost režimu generování paprsku (spojitý nebo impulsní). Při impulsním režimu je dále třeba znát množství zářivé energie v jednom impulsu, nejdelší trvání jednoho impulsu a největší opakovací kmitočet. Při vysokém opakovacím kmitočtu je důležitý údaj o největším středním výkonu vystupujícího záření. Podle těchto údajů se lasery zařazují do tříd: I., II., III.a), III.b) a IV. Pracoviště s lasery tříd III.b) a IV. se zpravidla vyhláší ve smyslu platných předpisů jako riziková. Laserové dálkoměry (pulsní, vlnová délka 1063 nm) jsou zpravidla zařazeny do III.b) třídy.

Při hygienickém posuzování rizika použití laseru ve volné přírodě (např. jako dálkoměru) je nutno znát vedle dříve zmíněných charakteristik ještě průměr svazku záření na výstupu a divergenci svazku.

Průměr svazku záření

Jednou z charakteristik záření laseru je zářivá energie, generovaná ve spojitým režimu

nebo v pulsech. Při zvětšování průměru vysílaného svazku záření se snižuje hustota toku energie ($W \cdot \text{cm}^{-2}$) a tím se také snižuje míra ohrožení zasažené pokožky, resp. zraku. Např. při průměru svazku záření 5 cm na výstupu z laseru při jeho ploše 19,62 cm² se z celkové jeho energie (v pulsu) může dostat na plochu rohovky vymezenou plochou maximálně rozšířené pupily (0,38 cm²) pouze 1,94 %.

Divergence svazku záření

Rozšiřováním svazku záření po výstupu z laseru se vyslaná energie postupně plošně roztýluje. Divergence paprsků se vyjadřuje v mrad ($= 3'26''$). Průměr plochy zasažené vyslaným svazkem ve vzdálenosti 1000 m při divergenci 1 mrad je 100 cm; pokud šlo o svazek záření o průměru 5 cm, pak má zasažená plocha průměr 105 cm.

Při pulsu laseru s výkonem 0,1 J svazkem o ploše 19,62 cm² na výstupu jde o zářivou energii 0,005102 J $\cdot \text{cm}^{-2}$ (5,1 mJ $\cdot \text{cm}^{-2}$). Při divergenci daného svazku 1 mrad bude zasažena ve vzdálenosti 1000 m plocha 0,8654 m a zářivá energie zde bude pouze 1,15 $\mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Uvedené propočty platí pouze pro tzv. ideální podmínky; ve skutečnosti je zářivá energie svazku postupně do různé míry absorbována prachem, aerosoly, mlhou, resp. deštěm či sněžením apod., které mohou v extrémních podmínkách v některých případech praktické využití laseru v terénu omezit až znemožnit. Při posuzování možného rizika používání daného laseru je nutno ovšem počítat především se situacemi maximálně dobré viditelnosti.

Vedle možnosti zasažení oka přímým paprskem laseru je nutno brát v úvahu také riziko od paprsků odražených. Při nárazu svazku paprsků na hladké a lesklé předměty se z praktických a bezpečnostních důvodů posuzuje ohrožení odraženým paprskem stejně jako u paprsku přímého. Odrazem od předmětů a objektů matných a členitých dochází ke změnám prostorové distribuce energie svazku záření do mnoha směrů a přitom se část energie absorbuje a zbytek odrazí (rozptýlí). Difúzní odražené záření se posuzuje podle tabulek s přihlédnutím ke korekčním faktorům a s přihlédnutím k době trvání pulsu, k jeho výchozí energii, k vlnové délce záření použitého laseru. Základní tabulky jsou uvedeny v přílohách hygienického předpisu MZd ČSR sv. 53/1982.

Riziku zasažení očí přímým nebo zrcadlově či difúzní odraženým zářením laserů v nadlimitních hodnotách se čelí používáním ochranných brýlí. Pro jejich volbu je nutno brát v úvahu vlnovou délku záření, zářivou energii ($J \cdot \text{cm}^{-2}$), hustotu toku energie ($W \cdot \text{cm}^{-2}$), dobu trvání emise záření a propustnost ochranných skel pro viditelné světlo. Při dostatečné ochraně oka před paprsky záření laseru z různých stran musí být zachováno dostatečné zorné pole a možnost používání korekčních brýlí nositelem. Všechny ochranné vlastnosti brýlí mu-

sí být řádně deklarovány s uvedením podmínek, za nichž bezpečně chrání zrak.

V armádě USA se používání ochranných brýlí u létajícího personálu údajně zatím nezavádí, poněvadž nevýhody brýlí, které jsou k dispozici (zmenšení zorného pole, zhoršení normálního vidění i vnímání barevných kontrastů), jsou pro letce současných letadel údajně větší, nežli ochranný přínos. Naproti tomu u osádek bojových vozidel jsou všichni ochrannými brýlemi vybaveni.

Podle normy USA Z 136.1-1976 se člení pracovníci s lasery s ohledem na rizikovost práce do tří skupin:

— Skupina s minimálním rizikem, kde je v daném uspořádání prakticky vyloučeno poškození očí nebo pokožky zářením laseru. U těchto osob se při nástupu práce zkontroluje vizus a další prohlídky se neorganizují.

— Mírné riziko je vyhlášováno v případech, kdy při určitých pracích je možné ohrožení svazkem paprsků laseru. Zde se před nástupem zaměstnání provede základní oční vyšetření (anamnéza, vizus, oční pozadí). Další vyšetření se provede v případech, kdy pracovník pozoruje poškození pokožky nebo zhoršení zraku, a povinně při ukončení zaměstnání.

— Vysoké riziko je uznáváno u pracovníků se systémy, kde nutno počítat s možností zasažení paprskem o dostatečně vysoké energii. Zde se provádí komplexní oční vyšetření před nástupem zaměstnání (spolu s vyšetřením kůže), dále každé tři roky a při ukončení zaměstnání a mimoto ve všech případech, kdy pracovník udává zhoršení zraku nebo poškození kůže v souvislosti s prací s laserem.

V naprosté většině případů má poškození zdraví člověka zářením laseru charakter úra-

zu. Příznaky mohou být subjektem v některých případech i přehlédnuty (zasažení periferních částí sítnice oka) a odhalí se až při odborném očním vyšetření. Při použití laserů, vysílajících nebezpečné záření ve volném terénu, musí být dodržovány zásady ochrany také nezúčastněných osob, a to jak před zasažením přímým svazkem, tak také paprsky odraženými. Obecné zásady bezpečné práce s lasery jsou stanoveny vyhláškami Českého a Slovenského úřadu bezpečnosti práce č. 125, resp. 126 (částka 25/1982 Sb.). Jejich ustanovení se vhodně doplňují a kombinují s požadavky již zmíněného předpisu hygienického. Zásady ochrany osob před zářením laserů používaných v ČSLA jsou shrnuty také v návrhu směrnice, která bude součástí příloh předpisu Zdrav-1-1.

Souhrn

Ve sdělení jsou stručně charakterizovány rizika práce s laserovými systémy s ohledem na vlnovou délku, intenzitu a dobu expozice záření především s ohledem na ohrožení struktury oka a poškození zraku. Při použití laserů ve volném terénu je upozorněno na význam průměru a divergence svazku záření. Jsou uvedeny požadavky na ochranné brýle, zásady diferencovaného provádění vstupních a průběžných lékařských preventivních prohlídek pracovníků s lasery a citovány hygienické a bezpečnostní předpisy platné v ČSSR.

Literatura u autora.

Klíčová slova: Záření laseru; Faktory záření; Hygienické zásady.