



Nowe kryteria oceny zagrożeń zdrowia wynikających z niezamierzonej ekspozycji na promieniowanie laserowe

AGNIESZKA WOLSKA, PIOTR GŁOGOWSKI

Centralny Instytut Ochrony Pracy, Państwowy Instytut Badawczy,
00-701 Warszawa, ul. Czerniakowska 16

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe zagrożenia dla oka i skóry wynikające z ekspozycji na promieniowanie laserowe oraz wybrane dane statystyczne dotyczące wypadków związanych z obsługą urządzeń laserowych. Omówiono nowe kryteria oceny zagrożenia promieniowaniem laserowym dla zdrowia, zawarte w Dyrektywie 2006/25/WE, której wymagania muszą być wdrożone do prawa polskiego do 27 kwietnia 2010 r. Scharakteryzowano zasady wyznaczania wartości Maksymalnych Dopuszczalnych Ekspozycji (MDE) w zależności od: długości fali promieniowania, trybu pracy urządzenia (ciągły, impulsowy), czasu ekspozycji oraz wytłumaczono znaczenia wprowadzonych współczynników korekcyjnych oraz punktów czasowych przy wyznaczaniu MDE. W sposób graficzny przedstawiono przebiegi zmienności MDE w funkcji czasu ekspozycji, długości fali oraz kąta widzenia źródła promieniowania dla poszczególnych podzakresów promieniowania optycznego (UV, VIS, IR). Przedstawiono również podobieństwa i różnice między kryteriami obowiązującymi w chwili obecnej w Polsce zawartymi w Rozporządzeniu MPiPS w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz kryteriami zawartymi w Dyrektywie 2006/25/WE.

Słowa kluczowe: optoelektronika, MDE, zagrożenie termiczne, zagrożenie fotochemiczne, kryteria oceny zagrożenia promieniowaniem laserowym

Symbol UKD: 621.375.826

1. Wprowadzenie

Urządzenia laserowe są obecnie szeroko stosowane w wielu gałęziach przemysłu, badaniach naukowych, medycynie i kosmetologii, telekomunikacji, ochronie środowiska i wojsku. Podczas normalnego ich użytkowania przy jednoczesnym

stosowaniu przez personel je obsługujący odpowiednich środków ochrony (związanych z rodzajem i klasą lasera) zazwyczaj prawdopodobieństwo niezamierzonej ekspozycji na promieniowanie laserowe o parametrach stanowiących zagrożenia dla zdrowia jest małe. Spośród siedmiu wyodrębnionych klas laserów [5], największe zagrożenie stanowią lasery klasy 3b i 4. Niezamierzona ekspozycja na emitowane przez nie promieniowanie bezpośrednie, jak również promieniowanie odbite od elementów otoczenia, a nawet rozproszone przez te obiekty, może spowodować poważne uszkodzenie oczu lub skóry. Lasery tych klas występują najczęściej w przemyśle (np. stosowane do spawania, cięcia, znakowania laserowego), w medycynie (np. skalpele, koagulatory laserowe) oraz w laboratoriach badawczych w nauce (zastosowanie różnych układów optycznych z wykorzystaniem nieosłoniętej wiązki laserowej). W przemyśle lasery tych klas na ogół są obudowane specjalnymi osłonami chroniącymi przed promieniowaniem laserowym wraz z zestawem różnych elektronicznych urządzeń zabezpieczających (np. interlock, zdalna blokada emisji promieniowania). W placówkach medycznych i naukowych natomiast najczęściej wiązka laserowa jest nieosłonięta i prawdopodobieństwo niezamierzonej ekspozycji staje się większe. Ma to swoje odzwierciedlenie w statystykach wypadków. Najwięcej zarejestrowanych wypadków przy urządzeniach laserowych zanotowano u pracowników technicznych (21%) oraz naukowców (18%). Przeważająca część tych wypadków dotyczy uszkodzeń wzroku (69%), a następnie skóry (12%). Głównymi powodami ich wystąpienia było: stosowanie uszkodzonych lub niewłaściwie dobranych okularów ochronnych (16%), brak ubrania ochronnego i okularów ochronnych (8%) oraz przypadkowe napromienienie (8%) [1]. Lasery, przy których obsłudze wystąpiło najwięcej wypadków, to najczęściej: Nd:YAG (29,7%), argonowe (20,5%) oraz CO₂ (12,8%) [1]. Takie statystyki wynikają z faktu, że ww. lasery są jednymi z najczęściej stosowanych laserów w przemyśle, medycynie i nauce. Zagrożenie promieniowaniem laserowym na stanowiskach pracy wiąże się przede wszystkim z możliwością ekspozycji pracownika, a zwłaszcza jego oczu na to promieniowanie. Zagrożenie to może pochodzić zarówno od wiązki laserowej bezpośrednio emitowanej z lasera, jak i od promieniowania odbitego od powierzchni, na którą pada to promieniowanie (różny stopień zagrożenia w zależności od klasy lasera).

2. Zagrożenia dla zdrowia powodowane przez promieniowanie laserowe

Zagrożenia promieniowaniem laserowym odnoszą się do oka oraz skóry. Promieniowanie laserowe z całego zakresu długości fal promieniowania optycznego (180 nm ÷ 1 μm) wywołuje w tkance efekty termiczne (w praktyce zakres, w którym generują lasery wynosi 180 nm ÷ 40 μm). Może to być: wzrost temperatury, zaczerwienienie, koagulacja, waporyzacja, zwęglenie, fotoablacja oraz efekty

elektromechaniczne. Rodzaj efektu zależy od wartości mocy promieniowania padającego na tkankę, długości fali promieniowania, rodzaju ekspozycji tkanki (oko, skóra) oraz czasu trwania ekspozycji.

Efekt oddziaływania promieniowania laserowego z tkanką bardzo silnie zależy od czasu trwania impulsów laserowych. Ta sama energia promieniowania niesiona w krótszym impulsie charakteryzuje się wyższą wartością mocy szczytowej, a tym samym może spowodować poważniejsze skutki szkodliwe dla zdrowia. Przy bardzo krótkich impulsach promieniowania (rzędu nanosekund) łatwo może dojść do zjawiska jonizacji, fotoablacji czy efektu elektromechanicznego w ekspozowanej tkance, natomiast dla impulsów dłuższych (rzędu μs) do waporyzacji i zwęglenia tkanki.

Zjawisko fotoablacji może również występować w przypadku ekspozycji na promieniowanie impulsowe, którego długość fali odpowiada ekstremalnie wysokiej wartości współczynnika absorpcji ekspozowanej tkanki. Ekstremalnym efektem oddziaływania promieniowania laserowego z tkankami są zjawiska elektromechaniczne polegające na przebicciu tkanki i wytworzeniu mikroplazmy na jej powierzchni oraz wzbudzeniu fali akustycznej w ośrodku. Oddziaływanie impulsów promieniowania laserowego o czasie trwania rzędu piko- i femtosekund wywołuje w tkankach odmienne efekty. W tym zakresie dominują procesy polowe wywołane polem elektrycznym wiązki promieniowania.

W przypadku promieniowania z zakresu długości fal 180÷600 nm oprócz oddziaływań termicznych mogą zachodzić w tkankach efekty fotochemiczne. Do skutków oddziaływania fotochemicznego zalicza się:

- skutki ostre, tj. pojawiające się w ciągu 24 godzin od ekspozycji takie jak: erytema, zapalenie rogówki oraz spojówki, poparzenia skóry, uszkodzenie siatkówki,
- skutki przewlekłe, tj. pojawiające się w znacznym oddaleniu czasowym na skutek chronicznych (wielokrotnych) ekspozycji, takie jak: zaćma, zmiany przednowotworowe i nowotworowe oka i skóry, fotostarzenie skóry.

W tabeli 1 zestawiono rodzaje zagrożeń dla oka i skóry przy ekspozycji na promieniowanie laserowe z różnych zakresów spektralnych.

TABELA 1

Rodzaje zagrożenia oka i skóry związane z ekspozycją na promieniowanie laserowe

| Zakres długości fal [nm] | Zakres | Rodzaj tkanki | Rodzaj zagrożenia |
|--------------------------|-----------|---------------|---|
| 180 do 400 | UV | oko | uszkodzenie fotochemiczne i termiczne rogówki, spojówki oraz soczewki |
| 180 do 400 | UV | skóra | uszkodzenie fotochemiczne i termiczne |
| 400 do 600 | widzialne | oko | uszkodzenie fotochemiczne siatkówki |

cd. tabeli 1

| Zakres długości fal [nm] | Zakres | Rodzaj tkanki | Rodzaj zagrożenia |
|--------------------------|-----------|---------------|---|
| 400 do 700 | widzialne | oko | uszkodzenie termiczne siatkówki |
| 400 do 600 | widzialne | skóra | uszkodzenie fotochemiczne |
| 400 do 700 | widzialne | skóra | uszkodzenie termiczne |
| 700 do 1400 | IRA | oko | uszkodzenie termiczne siatkówki |
| 700 do 1400 | IRA | skóra | uszkodzenie termiczne |
| 1400 do 2600 | IRB | oko | uszkodzenie termiczne rogówki oraz soczewki |
| 2600 do 10 ⁶ | IRB, IRC | oko | uszkodzenie termiczne rogówki |
| 1400 do 10 ⁶ | IRB, IRC | skóra | uszkodzenie termiczne |

3. Charakterystyka kryteriów oceny zagrożenia dla zdrowia związanych z ekspozycją na promieniowanie laserowe i wartości MDE zawartych w dyrektywie 2006/25/WE

Najwyższy poziom promieniowania laserowego, który nie powoduje obrażeń oczu i skóry określany jest w odpowiednich aktach prawnych: na poziomie krajowym — w rozporządzeniu, a na poziomie Unii Europejskiej — w dyrektywie. W Polsce maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) określa rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [3].

W UE graniczne wartości ekspozycji określa dyrektywa 2006/25/WE [4], której załącznik 2 obejmuje kryteria i wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) na promieniowanie laserowe. Kraje członkowskie mają obowiązek wdrożenia do 27 kwietnia 2010 roku zapisów ww. dyrektywy [4] do prawa krajowego. W związku z powyższym Polska również jest zobligowana do dostosowania obecnie obowiązujących wartości MDE na promieniowanie laserowe do wymagań zawartych w tej dyrektywie.

3.1. Sposób wyznaczania wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) na promieniowanie laserowe

Maksymalna dopuszczalna ekspozycja (MDE) określa poziom promieniowania laserowego, na który w normalnych warunkach mogą być ekspozycjonowane osoby bez doznawania szkodliwych skutków. Wartości MDE reprezentują maksymalny poziom

promieniowania, na który oko lub skóra mogą być ekspozowane bez wynikających z tego obrażeń, natychmiast lub po długim czasie.

Podstawowymi wielkościami fizycznymi, za pomocą których określone są wartości MDE na promieniowanie laserowe to: napromienienie wyrażone w J/m^2 , natężenie napromienienia wyrażone w W/m^2 oraz luminancja energetyczna wyrażona w $W/(m^2 \cdot sr)$.

3.1.1. Określanie MDE dla promieniowania ciągłego i impulsowego

- **Ekspozycja na promieniowanie ciągłe**

Wybór wartości MDE przy analizie zagrożenia promieniowaniem ciągłym przeprowadza się przy wykorzystaniu czasu jednorazowej ekspozycji (w przypadku oceny zagrożenia termicznego) oraz całkowitego czasu ekspozycji w ciągu zmiany roboczej (w przypadku oceny zagrożenia fotochemicznego).

- **Ekspozycja na promieniowanie impulsowe**

Przy analizie zagrożeń promieniowaniem impulsowym należy uwzględnić trzy poniższe zasady:

- Określenie zagrożenia pojedynczym impulsem.

W tym celu należy określić MDE na pojedynczy impuls promieniowania (MDE_{poj}). Jako czas ekspozycji należy przyjąć czas trwania impulsu.

- Określenie zagrożenia ciągiem impulsów w czasie ekspozycji.

W tym celu należy określić MDE na ciąg impulsów dostarczonych w czasie ekspozycji (odpowiednio jednorazowej ekspozycji dla zagrożenia termicznego oraz całkowitej ekspozycji dla zagrożenia fotochemicznego).

- Określenie zagrożenia termicznego ciągiem impulsów, których oddziaływanie ma charakter addytywny.

W tym celu należy określić wartość skumulowanego termicznego współczynnika korekcyjnego $C_p = N^{-0,25}$, gdzie N oznacza liczbę impulsów dostarczonych w czasie ekspozycji, a następnie przemnożyć przez wyznaczoną wartość MDE dla pojedynczego impulsu MDE_{poj} i do analizy przyjąć wartość wynikową nowego MDE_T .

$$MDE_T = C_p \cdot MDE_{poj}$$

3.1.2. Zróźnicowanie wartości MDE

Wartości MDE na promieniowanie laserowe zależą od długości fali, rodzaju ekspozowanej tkanki (oko lub skóra) i czasu ekspozycji. W przypadku oceny zagrożeń oka promieniowaniem z zakresu 400÷1400 nm przy wyznaczaniu wartości MDE dodatkowo uwzględnia się kąt widzenia źródła promieniowania (α). Z tego względu występuje cały szereg różnych wartości MDE, które zestawione są w trzech

tablicach oraz dodatkowa tablica z wartościami współczynników korekcyjnych uwzględnianych przy wyznaczaniu MDE. W efekcie często wyznaczanie wartości liczbowej MDE jest dość złożone i wymaga dodatkowej wiedzy merytorycznej, np. w zakresie obliczania parametrów promieniowania laserowego.

Zróżnicowanie wartości MDE zależy głównie od długości fali promieniowania, co wynika bezpośrednio z różnic wartości widmowego współczynnika absorpcji promieniowania laserowego w różnego rodzaju strukturach biologicznych (proteiny, melanina, woda). Przykładem jest wprowadzenie współczynnika C_A przy wyznaczaniu MDE oka i skóry promieniowaniem z zakresu 400÷1400 nm, który uwzględnia absorpcję promieniowania w melaninie.

Przy ocenie zagrożenia oka na szczególną uwagę zasługuje promieniowanie z zakresu 400÷1400 nm, które jest transmitowane przez elementy optyczne oka i ogniskowane na siatkówce. Wartość natężenia napromienienia na siatkówce może wzrosnąć nawet 500 tysięcy razy w stosunku do wartości natężenia napromienienia na rogówce. Z tego względu ten zakres promieniowania jest szczególnie niebezpieczny dla oka, gdyż uszkodzenie siatkówki może spowodować trwałe pogorszenie zdolności widzenia, a w skrajnych przypadkach nawet utratę wzroku. W tym zakresie promieniowania wartości MDE zależą od widmowego współczynnika transmisji elementów optycznych oka (rogówka, ciecz wodnista, soczewka, ciało szkliste), co przy wyznaczaniu MDE uwzględniają m.in. współczynniki C_B i C_C . Promieniowanie optyczne powyżej 1400 nm absorbowane jest w przednich elementach optycznych oka (głównie w rogówce) i dlatego w przypadku tego zakresu promieniowania najbardziej zagrożona jest rogówka oka.

3.1.3. Współczynniki korekcyjne oraz punkty czasowe

Jak wspomniano wcześniej, przy wyznaczaniu niektórych wartości MDE występują współczynniki korekcyjne, a także punkty czasowe, których zadaniem jest uwzględnienie skutku biologicznego dla oka lub skóry związanych z daną długością fali promieniowania, czasem ekspozycji czy też wielkością źródła promieniowania.

Występują cztery współczynniki korekcyjne: C_A , C_B , C_C i C_E . Znaczenie i przebiegi zmienności w odpowiadających poszczególnym współczynnikom w przedziałach widmowych lub kątowych przedstawiono poniżej:

- C_A — współczynnik korekcyjny ze względu na absorpcję promieniowania w melaninie (uwzględnia zmianę wartości widmowego współczynnika absorpcji promieniowania z zakresu 400÷1400 nm w melaninie); zwiększa wartość MDE oka i skóry wraz ze wzrostem długości fali, zgodnie z poniższymi zapisami:

$$\begin{array}{ll} C_A = 1,0 & \text{dla } \lambda < 700 \text{ nm,} \\ C_A = 10^{0,002(\lambda - 700)} & \text{dla } \lambda = 700 \div 1050 \text{ nm,} \\ C_A = 5,0 & \text{dla } \lambda = 1050 \div 1400 \text{ nm.} \end{array}$$

- C_B — współczynnik korekcyjny ze względu na zagrożenie fotochemiczne siatkówki oka światłem niebieskim; zwiększa wartość MDE oka wraz ze wzrostem długości fali z zakresu 400÷700 nm, zgodnie z poniższymi zapisami:

$$C_B = 1,0 \quad \text{dla } \lambda = 400 \div 450 \text{ nm,}$$

$$C_B = 10^{0,02(\lambda - 450)} \quad \text{dla } \lambda = 450 \div 700 \text{ nm.}$$

Jednak w praktyce współczynnik C_B stosowany jest w zakresie 400÷600 nm.

- C_C — współczynnik korekcyjny ze względu na absorpcję promieniowania z zakresu długości fal 700÷1400 nm w rogówce; zwiększa wartość MDE oka na promieniowanie o długości fali powyżej 1150 nm, zgodnie z poniższymi zapisami:

$$C_C = 1,0 \quad \text{dla } \lambda = 700 \div 1150 \text{ nm,}$$

$$C_C = 10^{0,018(\lambda - 1150)} \quad \text{dla } \lambda = 1150 \div 1200 \text{ nm,}$$

$$C_C = 8,0 \quad \text{dla } \lambda = 1200 \div 1400 \text{ nm.}$$

- C_E — współczynnik korekcyjny dla źródeł rozciągniętych emitujących promieniowanie z zakresu długości fal 400÷1400 nm; zwiększa wartość MDE oka dla kątów widzenia źródła promieniowania $\alpha > 1,5$ mrad, zgodnie z poniższymi zapisami:

$$C_E = 1,0 \quad \text{dla } \alpha < 1,5 \text{ mrad,}$$

$$C_E = \alpha/1,5 \quad \text{dla } 1,5 < \alpha \leq 100 \text{ mrad,}$$

$$C_E = \alpha^2/150 \quad \text{dla } \alpha > 100 \text{ mrad.}$$

W praktyce oznacza to, że dla źródeł punktowych (źródło punktowe przyjmuje się, gdy $\alpha < 1,5$ mrad) występują najmniejsze wartości MDE, czyli kryteria oceny zagrożenia są najostrzejsze.

Poza współczynnikami korekcyjnymi występują dwa punkty czasowe T_1 i T_2 , które uwzględniane są przy wyznaczaniu MDE oka:

- T_1 — punkt czasowy określający wartości czasów ekspozycji, powyżej których MDE dla zagrożenia fotochemicznego oka jest bardziej restrykcyjne (mniejsze wartości MDE) od MDE dla zagrożenia termicznego oka; jest on stosowany w zakresie długości fal 400÷600 nm i dotyczy czasów ekspozycji $t \geq 10$ s oraz punktowych źródeł promieniowania laserowego. Czasy ekspozycji przy których MDE dla zagrożenia fotochemicznego jest bardziej restrykcyjne od MDE dla zagrożenia termicznego siatkówki oka dla poszczególnych zakresów widmowych określają poniższe zapisy:

$$T_1 = 10 \text{ s} \quad \text{dla } \lambda < 450 \text{ nm,}$$

$$T_1 = 10 \cdot 10^{0,02(\lambda - 450)} \text{ s} \quad \text{dla } \lambda = 450 \div 500 \text{ nm,}$$

$$T_1 = 100 \text{ s} \quad \text{dla } \lambda > 500 \text{ nm.}$$

- T_2 — punkt czasowy decydujący o wyborze MDE oka dla źródeł rozciągłych w zależności od spełnienia warunku czy czas ekspozycji (t) jest większy lub mniejszy od T_2 ; w przypadku gdy $t > T_2$ należy przy wyznaczaniu MDE korzystać z wyznaczonej zgodnie z poniższymi zapisami wartości czasu T_2 , natomiast w przypadku gdy $t \leq T_2$ należy korzystać z rzeczywistego czasu ekspozycji t . Sposób wyznaczania wartości T_2 przedstawiają poniższe zapisy:

$$T_2 = 10 \text{ s} \quad \text{dla } \alpha \leq 1,5 \text{ mrad,}$$

$$T_2 = 10 \cdot [10^{(\alpha - 1,5) / 98,5}] \text{ s} \quad \text{dla } 1,5 < \alpha \leq 100 \text{ mrad,}$$

$$T_2 = 100 \text{ s} \quad \text{dla } \alpha > 100 \text{ mrad.}$$

Punkt czasowy T_2 stosowany jest dla zakresu długości fal 400÷1400 nm.

3.1.4. Określanie czasu ekspozycji

W przypadku gdy rozpatrywana długość fali promieniowania laserowego należy do przedziału 180÷600 nm, przeprowadza się ocenę zagrożenia termicznego oraz fotochemicznego, czyli wyznacza się dwie wartości MDE przyjmując odpowiednie czasy ekspozycji dla obu rodzajów zagrożeń. Natomiast dla zakresu długości fal powyżej 600 nm przeprowadza się tylko ocenę zagrożenia termicznego.

W przypadku oceny zagrożenia fotochemicznego do analizy należy przyjąć całkowity czas ekspozycji będący sumą czasów ekspozycji w trakcie zmiany roboczej. W przypadku analizy zagrożenia termicznego należy uwzględnić jednorazowy czas ekspozycji oraz, w przypadku promieniowania impulsowego, dodatkowo czas trwania pojedynczego impulsu.

W przypadku wyboru czasu ekspozycji podczas wyznaczania wartości MDE oka przy patrzeniu bezpośrednim w wiązkę (źródło punktowe) wskazane jest kierowanie się dodatkowymi praktycznymi zasadami, które wynikają z podstaw fizjologii widzenia. Do takich praktycznych zasad zalicza się:

- ograniczenie czasu jednorazowej ekspozycji oka na promieniowanie z zakresu widzialnego do 0,25 s (przy ocenie zagrożenia termicznego siatkówki oka); ograniczenie to odpowiada średniemu czasowi odruchu awersyjnego oka (mruganie, odchylenie głowy, odwracanie wzroku itp.) na jaskrawe źródła światła, co oznacza, że fizjologicznie dłuższe czasy bezpośredniej obserwacji jaskrawego źródła czasu są praktycznie niemożliwe i nawet jeśli wyznaczony czas jednorazowej ekspozycji jest dłuższy, to przy wyznaczaniu MDE oka przyjmujemy wartość jak dla czasu ekspozycji 0,25 s;
- ograniczenie czasu jednorazowej ekspozycji oka na promieniowanie podczerwone do 10 s; w przypadku promieniowania podczerwonego nie występują odruchy awersyjne, ponieważ mózg nie odnotowuje ekspozycji (promieniowanie to nie jest widziane przez narząd wzroku), natomiast ograniczenie to wynika z naturalnych ruchów gałki ocznej; z fizjologicz-

nego punktu widzenia ekspozycja jednego obszaru gałki ocznej nie może trwać dłużej niż 10 s; oznacza to, że jeśli wyznaczony czas jednorazowej ekspozycji jest dłuższy od 10 s, to przy wyznaczaniu MDE oka praktycznie przyjmujemy wartość jak dla czasu ekspozycji 10 s;

- ograniczenie całkowitego czasu ekspozycji oka na promieniowanie nadfioletowe do 100 s (przy ocenie zagrożenia fotochemicznego); ograniczenie to wynika z naturalnych ruchów gałki ocznej (czyli ekspozycja jednego obszaru gałki ocznej nie może trwać dłużej niż 10 s) oraz przyjętego ograniczenia do 10 ekspozycji w trakcie zmiany roboczej (przyjęto, że dłuższe od 100 s czasy ekspozycji są nierealne); ograniczenie to wynika również pośrednio z analizy tabel wartości MDE na promieniowanie nadfioletowe zawartych w dyrektywie [4];
- przyjęcie 10 s jako minimalny czas ekspozycji przy ocenie zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka, co wynika pośrednio z analizy tabel wartości MDE na promieniowanie widzialne z zakresu 400÷600 nm.

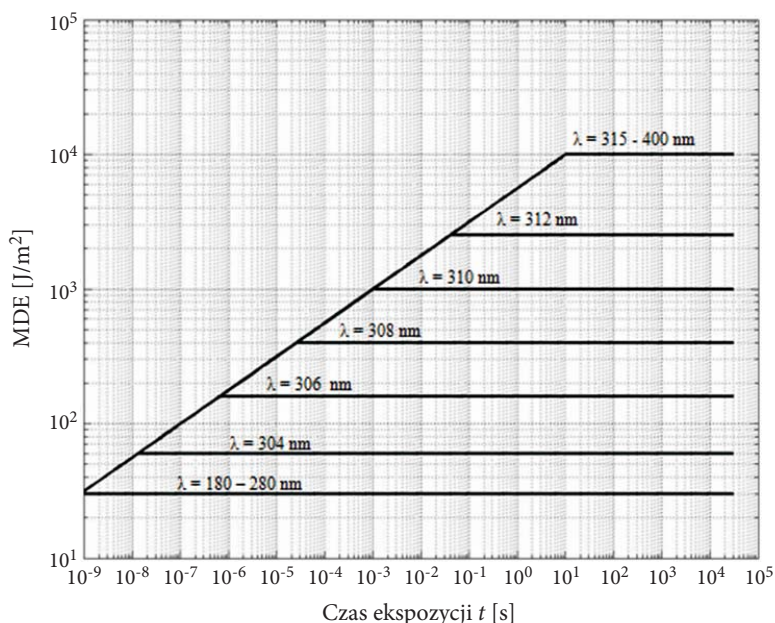
Należy w tym miejscu podkreślić, że choć dwa pierwsze z proponowanych powyżej ograniczeń przyjmowanego czasu ekspozycji nie mają swego formalnego zapisu w dyrektywie [4], to ich stosowanie w żaden sposób nie powinno wpłynąć na zmniejszenie restrykcyjności oceny zagrożenia. W związku z tym, że wraz ze wzrostem czasu ekspozycji wartości MDE rosną (tzn. są tym samym mniej restrykcyjne) przyjmowanie wartości mniejszych czasów ekspozycji wynikających z przyjętych ograniczeń powoduje, że wyznaczane w ten sposób wartości MDE będą bardziej restrykcyjne.

3.2. Wartości MDE oka i skóry

3.2.1. Promieniowanie nadfioletowe (zakres 180÷400 nm)

W zakresie promieniowania UV występują dwa rodzaje zagrożeń oka i skóry promieniowaniem laserowym: termiczne oraz fotochemiczne, wobec czego wartości MDE określa się dla tych dwóch rodzajów zagrożeń. W przypadku promieniowania z tego zakresu wartości MDE oka i skóry są takie same dla poszczególnych długości fal i czasów ekspozycji. Na rysunku 1 przedstawiono graficznie zakres zmian MDE dla wybranych długości fali λ z zakresu 180÷400 nm w funkcji czasu ekspozycji.

Z przebiegów zmienności przedstawionych na rysunku 1 wynika, że w zakresie UVC (180÷280 nm) występują najmniejsze wartości MDE, które są takie same w całym zakresie widmowym i nie zależą od czasu ekspozycji. W zakresie UVB wartości MDE rosną wraz ze wzrostem długości fali, co oznacza, iż są mniej restrykcyjne. Dodatkowo można zauważyć, że wraz ze wzrostem długości fali występuje dłuższy zakres zmienności MDE w zależności od czasu ekspozycji. W zakresie UVA (315÷400 nm) występują największe wartości MDE i w najdłuższym zakresie czasu ekspozycji występuje zmienność wartości MDE.



Rys. 1. MDE dla ekspozycji skóry i oka dla wybranych długości fal w zakresie 180÷400 nm, dla czasów ekspozycji 10^{-9} ÷ $3 \cdot 10^4$ s

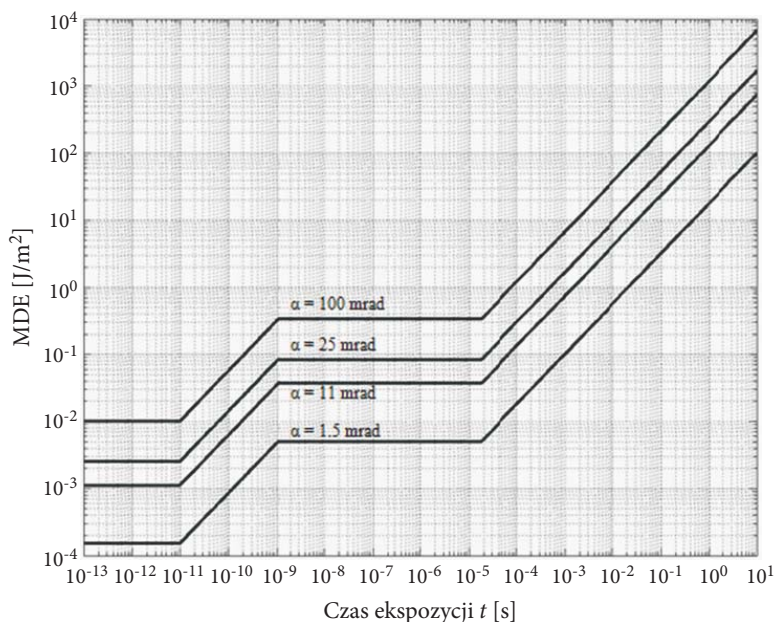
3.2.2. Promieniowanie widzialne i bliska podczerwień — IRA (zakres 400÷1400 nm)

W wypadku promieniowania widzialnego z zakresu długości fal 400÷600 nm rozpatruje się dwa rodzaje zagrożeń oka i skóry promieniowaniem laserowym: termiczne oraz fotochemiczne. Wartości MDE określa się dla tych dwóch rodzajów zagrożeń. Natomiast w pozostałym zakresie długości fal tj. 600÷1400 nm rozpatruje się tylko zagrożenie termiczne, wobec czego określa się jedną wartość MDE.

- **MDE oka**

Promieniowanie z zakresu 400÷1400 nm stanowi zagrożenie dla siatkówki oka. Przy wyznaczaniu wartości MDE dla zagrożenia termicznego uwzględnia się wartość kąta widzenia źródła promieniowania α , gdyż odzwierciedla to obszar siatkówki, na którym ogniskowany jest obraz źródła promieniowania. Jeżeli kąt α jest nieznan, wówczas do analizy należy przyjąć warunek najbardziej restrykcyjny, tzn. że występuje źródło punktowe, i wówczas wartość $\alpha = \alpha_{\min} = 1,5$ mrad.

Natomiast przy określaniu MDE dla zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka nie uwzględnia się kąta widzenia źródła promieniowania, natomiast uwzględnia się punkt czasowy T_1 . Tak więc w przypadku punktowych źródeł promieniowania emitujących w zakresie od 400 nm do 600 nm, analizuje się zagrożenie termiczne dla czasu ekspozycji t z zakresu $10 \text{ s} \leq t < T_1$ oraz fotochemiczne w przypadku gdy $t \geq T_1$.

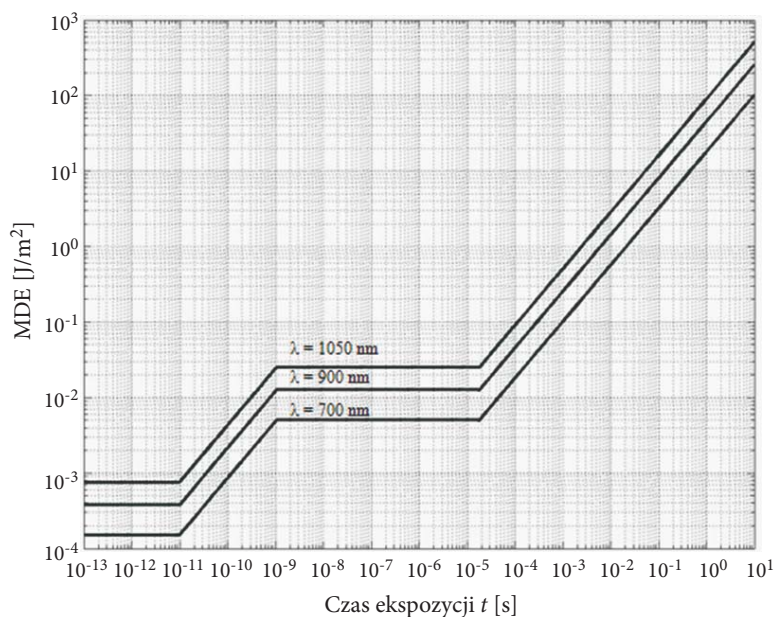


Rys. 2. MDE oka na promieniowanie laserowe dla wybranych kątów widzenia źródła promieniowania α z zakresu długości fal 400÷700 nm, dla czasów ekspozycji 10^{-13} ÷10 s

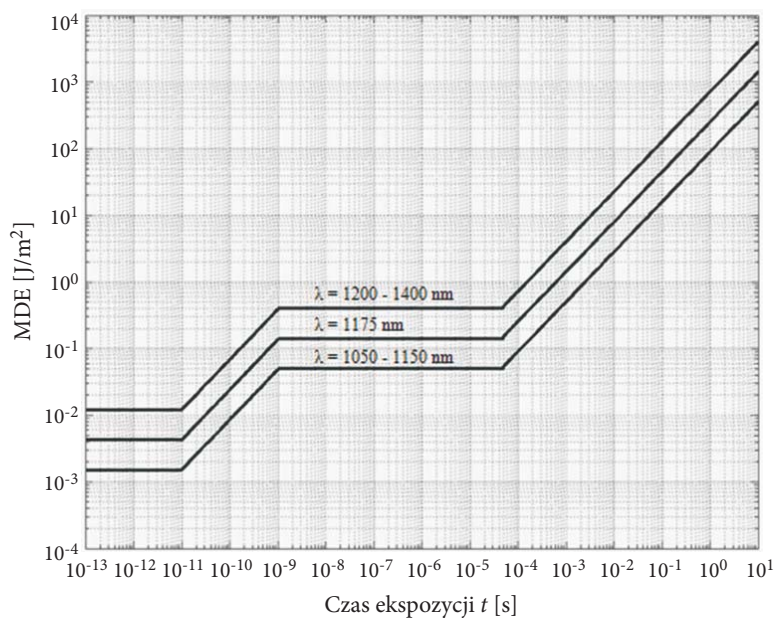
Na rysunku 2 przedstawiono graficznie zakres zmian MDE oka w określaniu zagrożenia termicznego siatkówki, dla wybranych kątów widzenia źródła promieniowania α z zakresu 1,5÷100 mrad w funkcji czasu ekspozycji.

Z przebiegów zmienności przedstawionych na rysunku 2 wynika, że najmniejsze wartości MDE występują dla źródeł punktowych ($\alpha \leq 1,5$ mrad), natomiast rosną wraz ze wzrostem wartości kąta widzenia źródła promieniowania α . Wraz ze wzrostem czasu trwania ekspozycji rosną wartości MDE. Przy ocenie zagrożenia termicznego siatkówki oka, wartości MDE są mniej restrykcyjne dla źródeł rozciągniętych oraz dłuższych czasów ekspozycji.

Przy wyznaczaniu wartości MDE na promieniowanie z zakresu IRA występują współczynniki korekcyjne: C_C (uwzględnia on ilość promieniowania docierającego do siatkówki ze względu na transmisję rogówki) oraz C_E (uwzględnia on rozciągłość źródła promieniowania). Promieniowanie IRA jest szczególnie niebezpieczne dla oka, ponieważ podobnie jak promieniowanie widzialne jest ono ogniskowane na siatkówce, jednakże mózg nie odnotowuje ekspozycji i nie ma odruchu obronnego, jakim jest odruch awersyjny oka. Z tego względu wartości MDE na to promieniowanie są bardziej restrykcyjne niż dla pozostałego zakresu podczerwieni (IRB i IRC). Na rysunkach 3 oraz 4 przedstawiono zakres zmian wartości MDE oka dla wybranych długości fal z zakresu 700÷1400 nm w funkcji czasu ekspozycji.



Rys. 3. MDE oka na promieniowanie laserowe dla wybranych długości fal w zakresie 700÷1050 nm, dla czasów ekspozycji 10⁻¹³÷10 s



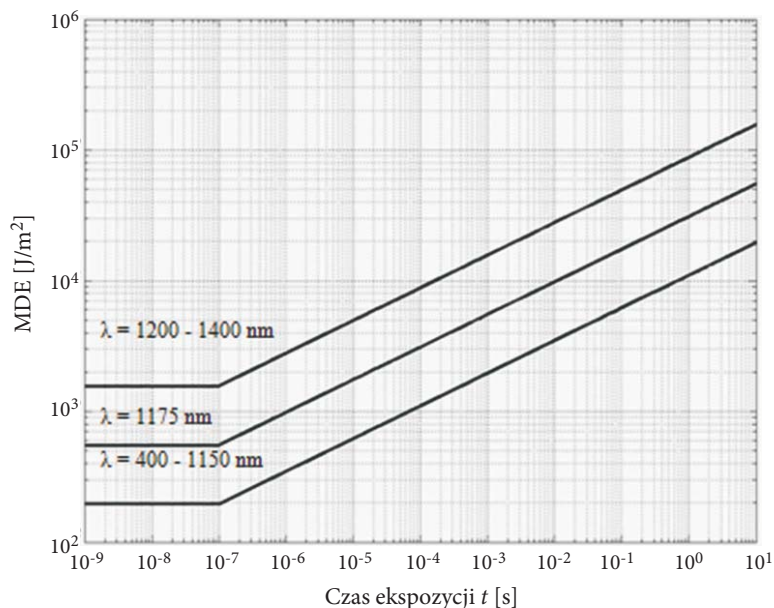
Rys. 4. MDE oka na promieniowanie laserowe dla wybranych długości fal w zakresie 1050÷1400 nm, dla czasów ekspozycji 10⁻¹³÷10 s

Z przebiegów zmienności przedstawionych na rysunkach 3 oraz 4 wynika, że najmniejsze wartości MDE występują dla długości fali 700 nm i wzrastają dla dłuższych fal z rozpatrywanego zakresu. Wraz ze wzrostem czasu trwania ekspozycji rosną wartości MDE, a tym samym kryteria oceny stają się mniej restrykcyjne.

- **MDE skóry**

Przy analizie zagrożenia skóry promieniowaniem z zakresu 400÷1400 nm nie uwzględnia się kąta widzenia źródła promieniowania α , natomiast uwzględnia się współczynnik korekcyjny C_A (uwzględnia on zmianę współczynnika absorpcji promieniowania w melaninie zawartego w skórze).

Na rysunku 5 przedstawiono graficznie zakres zmian wartości MDE skóry dla wybranych długości fal z zakresu 400÷1400 nm w funkcji czasu ekspozycji.

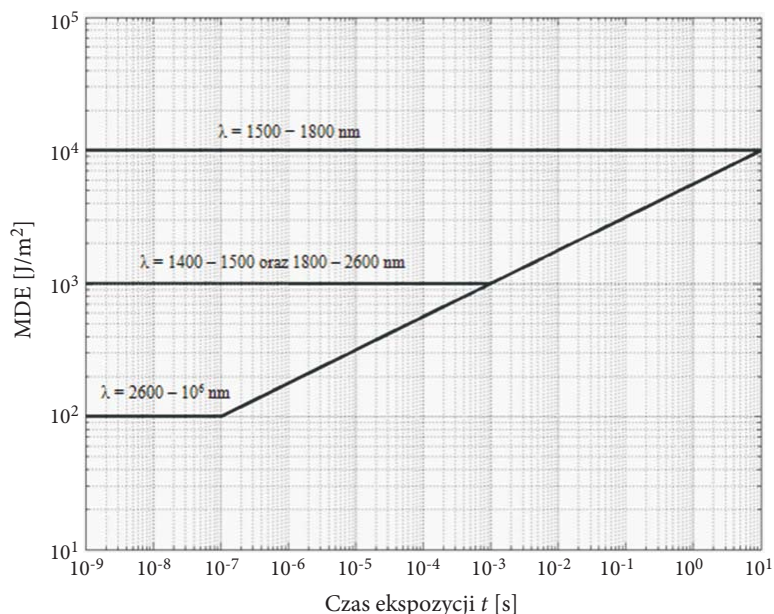


Rys. 5. MDE skóry na promieniowanie laserowe dla wybranych długości fal w zakresie 400÷1400 nm, dla czasów ekspozycji 10⁻⁹÷10 s

Z przebiegów zmienności przedstawionych na rysunku 5 wynika, że w zakresie 400÷1150 nm występują najmniejsze wartości MDE, które są takie same w całym zakresie widmowym, dodatkowo w zakresie czasów ekspozycji 10⁻⁹÷10⁻⁷ s mają stałą wartość, natomiast dla czasów $t > 10^{-7}$ s wzrastają wraz ze wzrostem czasu ekspozycji. W zakresie 1150÷1400 nm wartości MDE wzrastają wraz ze wzrostem długości fal dla czasów ekspozycji powyżej 10⁻⁷ s. Wartości MDE skóry wraz ze wzrostem czasu trwania ekspozycji, a tym samym kryteria oceny stają się mniej restrykcyjne.

3.2.3. Promieniowanie podczerwone IRB i IRC (zakres $1400 \div 10^6$ nm)

W przypadku promieniowania z zakresu IRB i IRC wartości MDE oka i skóry są takie same dla poszczególnych długości fal i czasów ekspozycji. Na rysunku 6 przedstawiono graficznie zakres zmian MDE dla wybranych długości fali λ z zakresu $1400 \div 10^6$ nm w funkcji czasu ekspozycji.



Rys. 6. MDE oka i skóry na promieniowanie laserowe dla wybranych długości fal w zakresie $1400 \div 10^6$ nm, dla czasów ekspozycji $10^{-9} \div 10$ s

Z przebiegów zmienności przedstawionych na rysunku 6 wynika, że najmniejsze wartości MDE występują dla długości fal z zakresu $2600 \div 10^6$ nm, co wynika z wysokiej absorpcji promieniowania z tego zakresu w rogówce. W zakresie czasów ekspozycji $10^{-9} \div 10^{-7}$ s MDE mają stałą, najmniejszą wartość, natomiast dla czasów $t > 10^{-7}$ s wzrastają wraz z czasem ekspozycji. Większe wartości MDE występują dla długości fal z zakresu $1400 \div 2600$ nm. Można zauważyć, że w zakresie $1500 \div 1800$ nm wartości MDE są największe i mają stałą wartość w całym zakresie czasu ekspozycji.

4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione kryteria oceny zagrożeń dla zdrowia związane z ekspozycją na promieniowanie laserowe i wartości MDE zawarte w dyrektywie 2006/25/WE na-

leży niebawem wdrożyć do prawa krajowego, co oznacza m.in. zmianę dotychczas obowiązujących w Polsce wartości MDE. W związku z tym przeprowadzono analizę porównawczą kryteriów i wartości MDE zawartych w dyrektywie [4] i rozporządzeniu [3], z której wynikają pewne podobieństwa i różnice.

4.1. Podobieństwa

W obu dokumentach wartości MDE odniesione są do: długości fali, czasu ekspozycji, rodzaju tkanki narażonej na uszkodzenie (oko, skóra), charakteru ekspozycji, rozmiaru obrazu źródła promieniowania na siatkówce oka. W związku z tym wartości MDE oka oraz skóry są w obu dokumentach bardzo zróżnicowane i zestawione w kilku osobnych tabelach, choć układ i podział tabel jest różny w obu dokumentach.

Zagrożenie promieniowaniem impulsowym w obu dokumentach rozpatruje się przy uwzględnieniu trzech kryteriów:

- ze względu na zagrożenie pojedynczym impulsem,
- ze względu na zagrożenie ciągiem impulsów (średnia moc ciągu impulsów) w obrębie czasu jednorazowej ekspozycji,
- ze względu na zagrożenie grupą impulsów w obrębie ciągu impulsów.

W zakresie promieniowania 180÷400 nm wartości MDE oka i skóry w obu analizowanych dokumentach są praktycznie równe, a nieznaczne odchylenia wartości wynikają z przyjętych zaokrągleń. Takie same wartości MDE w obu dokumentach występują również w zakresie podczerwieni średniej i dalekiej, tj. powyżej 2600 nm.

Oba dokumenty nie precyzują, jaki czas ekspozycji (jednorazowy czy całkowity) należy przyjąć przy analizie zagrożenia termicznego i fotochemicznego.

W obu dokumentach uwzględnianie są źródła rozciągłe, choć w różny sposób.

4.2. Różnice

Rozporządzenie [3] nie uwzględnia podziału zagrożeń na fotochemiczne oraz termiczne, natomiast dyrektywa [4] wyraźnie określa dla siatkówki oka zagrożenie termiczne (400÷700 nm) oraz fotochemiczne (400÷600 nm). Zagrożenia fotochemiczne dyrektywa uwzględnia dla czasów ekspozycji powyżej 10 s.

Dyrektywa wprowadza zróżnicowanie wartości MDE ze względu na czas trwania impulsu dla czasów poniżej 10^{-9} s, podczas gdy rozporządzenie rozpatruje jeden zakres.

W obrębie promieniowania z zakresu 400÷1400 nm dla źródeł punktowych (patrzenie bezpośrednio w wiązkę) wartości MDE przewidziane przez rozporządzenie są bardziej restrykcyjne lub równoważne z wartościami przewidzianymi przez dyrektywę. W tym zakresie w żadnym przypadku dyrektywa nie jest bardziej

restrykcyjna. Natomiast w przypadku źródeł rozciągniętych, pojawiają się wartości kątów widzenia źródła promieniowania oraz czasów ekspozycji, przy których bardziej restrykcyjna jest dyrektywa.

W zakresie 400÷1400 nm dla źródeł rozciągniętych rozporządzenie określa wartości MDE jako luminancję energetyczną źródła promieniowania, co jest jednoznaczne z uwzględnieniem wielkości kątowej źródła promieniowania również przy pomiarze tego parametru. Dyrektywa natomiast dla tego samego zakresu określa wartości MDE jako natężenie napromienia, a kąt jest uwzględniany przez współczynnik korekcyjny C_E . Można zatem stwierdzić, że rozporządzenie uwzględnia kąt widzenia źródła promieniowania na etapie pomiaru, natomiast dyrektywa na etapie oceny zagrożenia. Ponadto z punktu widzenia metrologicznego pomiar natężenia napromienienia jest pomiarem łatwiejszym do przeprowadzenia niż pomiar luminancji energetycznej, a aparatura pomiarowa do jego wyznaczenia jest bardziej dostępna.

Dla promieniowania z zakresu 1400÷2600 nm wartości MDE dla czasów ekspozycji poniżej 10 s przewidziane przez rozporządzenie są znacznie bardziej restrykcyjne. W pojedynczych przypadkach, dla określonych długości fal z początku zakresu wartości te w obu dokumentach są sobie równe.

4.3. Konkluzja

Wartości MDE zawarte w dyrektywie [4] wynikają z aktualnych wyników badań nad oddziaływaniem promieniowania laserowego z tkankami biologicznymi. Choć w większości przypadków są mniej restrykcyjne od wartości MDE rozporządzenia, to w wystarczający sposób ograniczają zagrożenia skutkami szkodliwymi przy ekspozycji na promieniowanie laserowe. Nie ma uzasadnionych merytorycznie powodów, aby utrzymywać bardziej restrykcyjne wartości MDE i tym samym wymagać od producentów urządzeń laserowych spełnienia tych wymogów, gdyż nie powinno to spowodować wzrostu zagrożenia pracowników ekspozycją na promieniowanie laserowe.

Artykuł wpłynął do redakcji 18.05.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2009 r.

LITERATURA

- [1] *Rockwell Laser Industries, Ins.*, RLI Laser Accident Database, <http://www.rli.com/resources/accident.aspx>
- [2] A. WOLSKA, P. KONIECZNY, *Promieniowanie laserowe — skutki zdrowotne i aspekty bezpieczeństwa*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 52, z. 228, Warszawa, 2006, 283-296.
- [3] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. nr 217, poz. 1833).

- [4] Dyrektywa 2006/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym) (dziewiętnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG).
- [5] PN EN 60825-1: 2005. Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 1: Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika.

A. WOLSKA, P. GŁOGOWSKI

New criteria of eye and skin hazards evaluation arising from accidental exposure to laser radiation

Abstract. Laser devices have found recently wide range of applications like: industry, medicine, science, telecommunication, environment and military. Probability of exposition to laser radiation that can be hazardous is very small, especially when personnel using laser devices wear protective clothes, especially protective eyewear.

Hazards arising from exposition to laser radiation are related separately to eye and skin. Hazards may be caused by direct beam, as well as reflected and scattered beam (depending on laser class).

Laser radiation in the whole optical range (180 nm ÷ 1 mm) causes thermal effect in exposed tissue (presently lasers devices generate radiation in the range of 180 nm ÷ 40 μm). As thermal effects we can mention: tissue temperature increase, erythema, coagulation, vaporization, carbonization, photoablation and electromechanics phenomenon. Occurrence of those effects depends on laser radiation power density, wave-length, type of exposed tissue (eye and skin) and exposition time.

The highest level of radiation that does not cause any damage to exposed tissue is called Maximal Permissible Exposure (MPE). In Poland, values of MPE to laser radiation are included in Regulation of Ministry of Labour and Social Policy on maximal permissible concentrations and intensities of hazardous factors in Labour environment. In Europe, values of MPE to laser radiation are included in annex no. II to Directive 2006/25/EU.

The article presents eye and skin hazards related to the exposition to laser radiation and statistical data on accidents while operating laser devices. New criteria of eye and skin hazards evaluation arising from laser radiation, included in Directive 2006/25/EU have been presented. Those criteria have to be implemented into Polish law until 27 April 2010.

Rules for defining values of the Maximal Permissible Exposure (MPE) in dependence of: laser radiation wavelength, device work regime (CW or pulsed), exposure time have been presented. Values of correction factors and time points necessary for MPE defining have been explained. Article includes charts showing variations of MPE values as a function of exposure time, radiation wavelength and angular subtense of a source for different ranges of optical radiation (UV, VIS, IR). The article presents comparison of laser's radiation hazard evaluation criteria contained in regulation of Ministry of Labour and Social Policy (on maximal permissible concentrations and intensities of hazardous factors in Labour environment) and EU Directive.

Keywords: optoelectronics, MPE, thermal damage, photochemical damage, criteria occupational risk assessment

Universal Decimal Classification: 621.375.826

