

dr inż. GRZEGORZ OWCZAREK (ORCID: 0000-0003-3744-6535)  
 dr inż. JOANNA SZKUDLAREK (ORCID: 0000-0002-8728-0118)  
 dr inż. MARCIN JACHOWICZ (ORCID: 0000-0002-6402-6897)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: growc@ciop.lodz.pl  
 DOI: 10.5604/01.3001.0014.6642

# Maksymalna dopuszczalna ekspozycja (MDE) w ocenie zagrożeń oczu i skóry wywołanych promieniowaniem laserowym

W artykule omówiono sposoby określania lub wyliczania wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji (MDE) oka i skóry na promieniowanie laserowe oraz znaczenie tych wartości w ocenie ryzyka związanego z narażeniem człowieka na przypadkową ekspozycję promieniowaniem laserowym. Omówiono opracowane algorytmy do wyznaczania MDE, bazujące na wytycznych określonych w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Zaprezentowano również przykłady obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem algorytmów, wskazując na znaczenie MDE w ocenie ryzyka związanego z narażeniem człowieka na przypadkową ekspozycję promieniowania laserowego.

*Słowa kluczowe: maksymalna dopuszczalna ekspozycja, zagrożenia oczu i skóry, promieniowanie laserowe, ryzyko zawodowe*

## Maximum permissible exposure (MPE) in the assessment eye and skin hazards caused by laser radiation

The article describes how to determine or calculate the value of the maximum permissible exposure (MPE) of laser radiation to eyes and skin. The importance of these values in the risk assessment of human exposure to accidental laser radiation were also discussed. The developed algorithms for determining MPE are based on the guidelines set out in the Regulation of the Minister of Labour and Social Policy of June 6, 2014 on the maximum permissible concentrations and intensities of harmful factors in the work environment. Examples of calculations carried out with the use of the developed algorithms are also presented. These examples show the importance of MPE in assessing the risk of human exposure to accidental exposure to laser radiation.

*Keywords: maximum permissible exposure, eye and skin hazards, laser radiation, occupational risk*

## Wstęp

Jednym z najważniejszych elementów w odniesieniu do zagadnień związanych z bezpieczeństwem obsługi urządzeń laserowych jest analiza zagrożeń wywołanych samym promieniowaniem laserowym oraz wynikająca z tej analizy ocena ryzyka uszkodzenia oczu lub skóry w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy wiązka promieniowania laserowego nie jest osłonięta, a co za tym idzie, promieniowanie laserowe może oddziaływać bezpośrednio na człowieka,

tj. z tzw. otworu wyjściowego lasera. Bardzo niebezpieczne może być również promieniowanie rozproszone (np. na powierzchniach elementów znajdujących się w pomieszczeniu, w którym pracuje laser) [1]. Rodzaj efektu zależy od wartości mocy promieniowania padającego na tkankę, długości fali promieniowania, rodzaju ekspozycji tkanki oraz czasu trwania ekspozycji [2].

Badania związane z określeniem ryzyka na skutek ekspozycji na promieniowanie laserowe prowadzone są już od lat 60. ubiegłego wieku, a więc podjęto je bezpośrednio po uruchomieniu w 1960 r.

przez T. Maimana pierwszego lasera [3]. Standardy w tym obszarze były proponowane przez wiele różnych agencji oraz organizacji normalizacyjnych [4]. W kolejnych latach rozwijane były również metody związane ze sposobem wyznaczania wartości fizycznych pozwalających odnieść się do ryzyka związanego z ekspozycją człowieka na promieniowanie laserowe [5, 6].

Promieniowanie laserowe to promieniowanie optyczne, które może być emitowane w zakresie długości fali od nadfioletu (od około 180 nm) do dalekiej podczerwieni (do około 1 000 000 nm).

Takie cechy promieniowania laserowego, jak monochromatyczność, spójność i kierunkowość sprawiają, że natężenie napromienienia (E, wyrażone w  $W/m^2$ ) może być bardzo duże. Analogicznie duża może być wartość napromienienia (H, wyrażona w  $J/m^2$ ), czyli ilość energii, jaka jest przez nie przenoszona, nawet w relatywnie krótkich impulsach. Duże wartości oznaczają w tym przypadku takie, które w wyniku niezamierzonej ekspozycji promieniowania laserowego na człowieka mogą wywołać urazy oczu lub skóry.

Skutki oddziaływania wysokoenergetycznego promieniowania laserowego na oczy lub skórę można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje – termiczne i fotochemiczne. W przypadku ekspozycji promieniowania laserowego na oczy termicznymi skutkami oddziaływania są m.in. oparzenia rogówki oraz uszkodzenie lub poparzenie siatkówki. Termiczne skutki oddziaływania promieniowania laserowego na skórę to zaczerwienienie lub poparzenie, a w przypadku znacznego przekroczenia wartości bezpiecznych nawet koagulacja tkanek i zwęglenie skóry. Skutki fotochemiczne, wynikające z oddziaływania promieniowania laserowego na oko, mogą objawiać się m.in. zaciemnieniem lub zapaleniem rogówki i spojówki oka, jak również uszkodzeniem lub poparzeniem siatkówki. Ekspozycja oka na promieniowanie laserowe stanowiące zagrożenie o charakterze fotochemicznym może być również przyczyną powstawania nowotworów oka. Fotochemiczne oddziaływanie promieniowania laserowego na skórę bywa powodem zaczerwienienia, poparzeń, pigmentacji lub fotostarzenia skóry.

Celem artykułu jest zaprezentowanie algorytmu do wyznaczania MDE bazującego na wytycznych określonych w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz wskazanie na znaczenie MDE w ocenie ryzyka zawodowego związanego z narażeniem człowieka na przypadkową ekspozycję promieniowania laserowego.

## Maksymalna dopuszczalna ekspozycja – definicja oraz sposoby wyznaczania

Maksymalna dopuszczalna ekspozycja (MDE) to poziom promieniowania laserowego, na który w normalnych warunkach mogą być ekspozycjonowane osoby bez doznawania szkodliwych skutków. Wartości MDE reprezentują maksymalny poziom promieniowania, na które oko lub skóra mogą być ekspozycjonowane bez wynikających z tego obrażeń, czy to występujących natychmiast, czy dopiero po długim czasie. Pod pojęciem poziomu promieniowania rozumiana jest moc (wyrażona w watach – W) lub energia (wyrażona w dżulach – J) promieniowania laserowego określona na jednostkowej powierzchni (wyrażonej w  $m^2$ ), na jaką narażony jest człowiek.

Wartości MDE wyrażane są jak natężenie napromienienia (E, wyrażone w  $W/m^2$ ) lub napromienienie (H, wyrażone w  $J/m^2$ ).

Najważniejszymi dokumentami, w których znajduje się odniesienie do maksymalnego bezpiecznego dla człowieka poziomu promieniowania laserowego, są: PN-EN 60825-1: 2014 [7], dyrektywa 25/2006/WE [8] oraz rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. [9]. W PN-EN 60825-1: 2014 oraz ww. rozporządzeniu napisano wprost o maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji (ang. maximum permissible exposure – MPE). W dyrektywie 25/2006/WE są to wartości graniczne ekspozycji (ang. *exposure limit values*), które zostały określone zarówno w odniesieniu do nielasowego, jak i lasowego sztucznego promieniowania optycznego. Wartości te są w tym akcie prawnym definiowane jako wartości ekspozycji na promieniowanie optyczne, które bezpośrednio opierają się na ustalonych skutkach zdrowotnych i względach biologicznych. Zastosowanie się do tych wartości granicznych zapewnia pracownikom narażonym na promieniowanie optyczne emitowane przez sztuczne źródła promieniowania ochronę przed wszystkimi znanymi niekorzystnymi dla zdrowia skutkami.

Niezależnie od tego, czy maksymalny bezpieczny dla człowieka poziom promieniowania laserowego określany jest jako maksymalna dopuszczalna ekspozycja, czy też jako wartość graniczna ekspozycji, wartości te są wyrażone jak natężenie napromienienia (E) lub napromienienie (H), a przy ich określeniu lub wyliczeniu uwzględnia się takie parametry charakteryzujące promieniowanie laserowe, jak: długość fali, czas trwania impulsu lub ekspozycji, rodzaj narażonego narządu (oko lub skóra) oraz kąt widzenia źródła promieniowania laserowego (tylko w przypadku oka oraz promieniowania z zakresu 400–1400 nm, a więc promieniowania, które może dotrzeć bezpośrednio do siatkówki oka).

Długość fali promieniowania laserowego, którego jedną z cech jest monochromatyczność, ma fundamentalne znaczenie w określeniu wartości MDE. Wraz z długością fali zmienia się energia pojedynczego kwantu promieniowania laserowego. Zgodnie ze wzorem Plancka (patrz: wzór 1) energia ta jest odwrotnie proporcjonalna do długości emitowanej fali.

$$E(\lambda) = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad \text{gdzie:} \quad (1)$$

$h$  – stała Plancka,  
 $c$  – prędkość światła,  
 $\lambda$  – długość fali.

Równie istotnym parametrem uwzględnianym przy wyliczaniu wartości MDE jest czas, w którym narażona tkanka poddawana jest ekspozycji na promieniowanie laserowe. Oczywiście jest, że wraz z wydłużeniem czasu ekspozycji ilość energii, jaka zostanie przeniesiona przez promieniowanie laserowe na powierzchnię ekspozycjonowanej tkanki, będzie większa, a co za tym idzie – zwiększy się absorpcja promieniowania laserowego w głąb naświetlonego obszaru.

Niezależnie od wymienionych powyżej doświadczeń, w których odniesiono się do maksymalnego bezpiecznego dla człowieka poziomu

promieniowania laserowego, poziom ten wyznaczony jest w korelacji długości fali promieniowania laserowego wraz z czasem ekspozycji, co pokazano na rys. 1.

	CZAS EKSPOZYCJI (s)
DŁUGOŚĆ FALI (nm)	MDE / WARTOŚCI
	GRANICZNE EKSPOZYCJI dla danej długości fali (zakresu długości fali) oraz dla określonego czasu ekspozycji

Rys. 1. Zasada korelacji długości fali i czasu ekspozycji przy wyznaczaniu MDE lub wartości granicznych ekspozycji (CIOP-PIB)  
 Fig. 1. The principle of the correlation of wavelength and exposure time for determination MDE or exposure limit values (CIOP-PIB)

W zależności od energii pojedynczego kwantu promieniowania laserowego zmienia się charakter oddziaływania tego promieniowania z materią, a więc również ze strukturą tkankową oka lub skóry.

Wartości MDE lub wartości graniczne ekspozycji mogą być określone jako konkretne, ustalone wartości natężenia napromienienia (E) lub napromienienia (H), jak również mogą być wyliczane z wykorzystaniem wzorów.

Zgodnie z rozporządzeniem z dnia 6 czerwca 2014 r. wartości MDE określa się w stosunku do promieniowania laserowego o długości fal w zakresie 180–106 nm i w odniesieniu do czasów trwania ekspozycji od  $10^{-13}$  s do  $3 \cdot 10^4$  s. Ten bardzo szeroki przedział zakresu długości fal oraz czasów ekspozycji został podzielony – z uwagi na ekspozycjonowany narząd (oko i skóra) oraz charakter zagrożenia, wywołanego promieniowaniem nadfioletowym (widzialnym lub podczerwonym) – w następujący sposób:

- MDE oka i skóry na promieniowanie laserowe z zakresu 180–400 nm (obejmuje czasy ekspozycji od  $10^{-13}$  s do  $3 \cdot 10^4$  s),
- MDE oka na promieniowanie laserowe z zakresu 400–1400 nm i o czasie ekspozycji krótszym niż 10 s (obejmuje czasy ekspozycji od  $10^{-13}$  s do mniej niż 10 s),
- MDE oka na promieniowanie laserowe z zakresu 400–1400 nm i o czasie ekspozycji dłuższym lub równym 10 s (obejmuje czasy ekspozycji od 10 s do  $3 \cdot 10^4$  s),
- MDE skóry na promieniowanie laserowe z zakresu 400–1400 nm (obejmuje czasy ekspozycji od  $10^{-13}$  s do  $3 \cdot 10^4$  s),
- MDE oka i skóry na promieniowanie laserowe z zakresu 1400–10<sup>6</sup> nm (obejmuje czasy ekspozycji od  $10^{-13}$  s do  $3 \cdot 10^4$  s).

Gdy znana jest długość fali promieniowania laserowego oraz czas trwania ekspozycji, określenie wartości MDE może sprowadzać się jedynie do odczytania odpowiednich danych z tabel zamieszczonych w rozporządzeniu z dnia 6 czerwca 2014 r.

## Maksymalna dopuszczalna ekspozycja – przykłady wyliczania wartości MDE

Poniżej zaprezentowano kilka przykładów wyliczania wartości MDE zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w rozporządzeniu z dnia 6 czerwca 2014 r.

W przypadku promieniowania laserowego z przedziału długości fal 315–400 nm i o czasie ekspozycji z przedziału  $10^{-13}$ – $10^4$  s wartość MDE określona jest jako napromienienie E i wynosi  $104 \text{ J/m}^2$ .

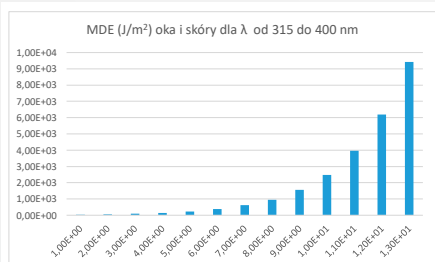
W innych przypadkach wartości MDE wyliczane są ze wzorów. W stosunku do wymienionego powyżej zakresu długości fal (315–400 nm), lecz biorąc pod uwagę czasy ekspozycji od  $10^{-13}$  s do 10 s, wartość MDE należy wyliczyć ze wzoru:

$$H = 5,6 \cdot t^{0,25} \text{ J/m}^2 \text{ gdzie:} \quad (2)$$

H – napromienienie odpowiadające wartości MDE,

t – rzeczywisty czas trwania ekspozycji (czas z przedziału  $10^{-13}$  s do 10 s).

Na rys. 2. przedstawiono, jak zmieniają się wartości MDE w odniesieniu do zakresu długości fal 315–400 nm w zależności od czasu ekspozycji z przedziału  $10^{-13}$ –10 s.



Rys. 2. MDE oka i skóry dla długości fal z zakresu 315–400 nm i czasu trwania ekspozycji  $10^{-13}$ –10 s (na podstawie symulacji przeprowadzonej przez autorów)

Fig. 2. MDE of the eye and skin for wavelengths in the range 315–400 nm and exposure time  $10^{-13}$ –10 s (based on simulation conducted by the authors)

Zaprezentowany powyżej przykład wyliczania wartości MDE uwzględnia jedynie rzeczywisty czas trwania ekspozycji promieniowania laserowego.

Wartości MDE lub wartości graniczne ekspozycji mogą być wyliczane również z wykorzystaniem wzorów, w których uwzględnione są współczynniki korekcyjne i inne parametry obliczeniowe.

Współczynniki korekcyjne wprowadzane są ze względu na właściwości absorpcyjne promieniowania w tkankach oraz charakter zagrożenia (fotochemiczne) wywołanego promieniowaniem laserowym o określonym zakresie długości fal. W sposobie wyznaczania MDE przyjętym w rozporządzeniu z dnia 6 czerwca 2014 r. są to:

$C_A$  – współczynnik korekcyjny ze względu na absorpcję promieniowania w melaninie (uwzględnia zmianę wartości widmowego współczynnika absorpcji promieniowania z zakresu 400–700 nm w melaninie). Zwiększa wartość MDE oka i skóry wraz ze wzrostem długości fali;

$C_B$  – współczynnik korekcyjny ze względu na zagrożenie fotochemiczne siatkówki oka światłem niebieskim. Zwiększa wartość MDE oka na promieniowanie z zakresu 400–700 nm. W praktyce współczynnik  $C_B$  stosowany jest w zakresie 400–600 nm;

$C_C$  – współczynnik korekcyjny ze względu na absorpcję promieniowania z zakresu długości fali 700–1400 nm w rogówce oka. Zwiększa wartości MDE oka na promieniowanie o długości fali powyżej 1150 nm.

Współczynniki korekcyjne i parametry stosowane we wzorach służących do wyliczenia MDE lub wartości granicznych ekspozycji uwzględniają również wielkość źródła emisji promieniowania laserowego oraz czas trwania ekspozycji. W rozporządzeniu z dnia 6 czerwca 2014 r. są to:

$C_E$  – współczynnik korekcyjny w odniesieniu do źródeł rozciągniętych emitujących promieniowanie z zakresu długości fal 400–1400 nm. Zwiększa wartości MDE oka wobec kątów widzenia źródła promieniowania  $\alpha > 1,5$  mrad;

$T_1$  – parametr określający wartość czasów trwania ekspozycji, powyżej których MDE dotyczące zagrożenia fotochemicznego oka do wadziej restrykcyjne (mniejsza wartość MDE) od MDE dotyczącego zagrożenia termicznego oka. Stosowany jest w zakresie długości fal 400–600 nm. Dotyczy czasów trwania ekspozycji  $t \geq 10$  s i punktowych (nierozciągniętych) źródeł promieniowania laserowego;

$T_2$  – parametr decydujący o wyborze MDE oka w stosunku do źródeł punktowych (stosowany dla zakresu długości fal 400–1400 nm) w zależności od spełnienia warunku  $t > T^2$  (czas trwania ekspozycji jest większy od parametru  $T_2$ ). W przypadku spełnienia tego warunku należy do wzoru na MDE podstawić czas trwania ekspozycji, którego wartość jest równa parametrowi  $T_2$ . W przypadku, gdy  $t \leq T_2$  (czas trwania ekspozycji) jest mniejszy lub równy wartości parametru  $T_2$ , należy do wzoru

na MDE podstawić rzeczywisty czas trwania ekspozycji t.

We wzorach służących do wyliczenia MDE zgodnie z rozporządzeniem z dnia 6 czerwca 2014 r. wykorzystywane są współczynniki korekcyjne  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  i  $C_E$  oraz parametr  $T_2$ . Cytowane rozporządzenie określa jeszcze tzw. kąt odbioru źródła Y. Jest to stożkowy kąt ograniczający pole widzenia źródła. Jego wartość uwzględniana jest przy pomiarach ekspozycji w odniesieniu do zakresu długości fal 400–600 nm.

Wszystkie wymienione i opisane powyżej współczynniki korekcyjne i parametry zestawiono w tab. 1.

Przedstawione w tab. 1. współczynniki korekcyjne i inne parametry obliczeniowe stosowane są do wyliczania MDE praktycznie we wszystkich pozostałych przypadkach poza omówionym powyżej sposobem wyliczania MDE oka i skóry na promieniowanie laserowe z zakresu nadfioletu (180–400 nm).

Poniżej przedstawiono przykład wyznaczania MDE oka w odniesieniu do zakresu długości fal 700–1050 nm, przy kącie widzenia źródła  $\alpha < 1,5$  mrad i czasie ekspozycji z przedziału  $10^{-13}$ –10 s.

Do wyliczenia MDE w tym zakresie długości fal oraz czasów ekspozycji stosowane są następujące wzory:

$$H = 1,5 \cdot C_A \cdot C_E \text{ J/m}^2 \text{ gdzie:} \quad (3)$$

Tabela 1. Wartości stosowanych współczynników korekcyjnych i innych parametrów obliczeniowych [9]  
Table 1. Values of the applied correction factors and other calculation parameters [9]

Parametr	Obowiązujący zakres widmowy (nm)	Wartość
$C_A$	$\lambda < 700$	$C_A = 1,0$
	700–1050	$C_A = 10^{0,002(\lambda-700)}$
	1050–1400	$C_A = 5,0$
$C_B$	400–450	$C_B = 1,0$
	450–700	$C_B = 10^{0,02(\lambda-450)}$
$C_C$	700–1150	$C_C = 1,0$
	1150–1200	$C_C = 10^{0,018(\lambda-1150)}$
	1200–1400	$C_C = 8,0$
$T_1$	$\lambda < 450$	$T_1 = 10 \text{ s}$
	450–500	$T_1 = 10 \cdot 10^{0,02(\lambda-450)} \text{ s}$
	$\lambda > 450$	$T_1 = 100 \text{ s}$
Parametr	Obowiązujący zakres kątowy (mrad)	Wartość
$C_E$	$\alpha < 1,5$	$C_E = 1,0$
	$1,5 < \alpha < 100$	$C_E = \alpha/1,5 \text{ mrad}$
	$\alpha > 100$	$C_E = \alpha^2/150 \text{ mrad}$
$T_2$	$\alpha < 1,5$	$T_2 = 10 \text{ s}$
	$1,5 < \alpha < 100$	$T_1 = 10 \cdot 10^{(\alpha-1,5)/98,5} \text{ s}$
	$\alpha > 100$	$T_2 = 100 \text{ s}$
Parametr	Obowiązujący zakres czasu trwania ekspozycji (s)	Wartość
Y	$t \leq 100$	Y = 11 mrad
	$100 < t < 10^4$	Y = $1,1 \cdot t^{0,5} \text{ mrad}$
	$t > 10^4$	Y = 110 mrad

H – napromienienie odpowiadające wartości MDE w odniesieniu do zakresu czasu trwania ekspozycji  $10^{-13}$ – $10^{-11}$  s,  
 $C_A, C_B$  – współczynniki korekcyjne.

$$H = 2,7 \cdot 10^5 \cdot t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_B \text{ J/m}^2 \text{ gdzie: (4)}$$

H – napromienienie odpowiadające wartości MDE w odniesieniu do zakresu czasu trwania ekspozycji  $10^{-11}$ – $10^{-9}$  s,  
 $C_A, C_B$  – współczynniki korekcyjne.

$$H = 5 \cdot 10^2 \cdot C_A \cdot C_B \text{ J/m}^2 \text{ gdzie: (5)}$$

H – napromienienie odpowiadające wartości MDE w odniesieniu do zakresu czasu trwania ekspozycji  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-5}$  s,  
 $C_A, C_B$  – współczynniki korekcyjne.

$$H = 90 \cdot t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_B \text{ J/m}^2 \text{ gdzie: (6)}$$

H – napromienienie odpowiadające wartości MDE w odniesieniu do zakresu czasu trwania ekspozycji  $5 \cdot 10^{-5}$ – $10$  s,  
 $C_A, C_B$  – współczynniki korekcyjne.

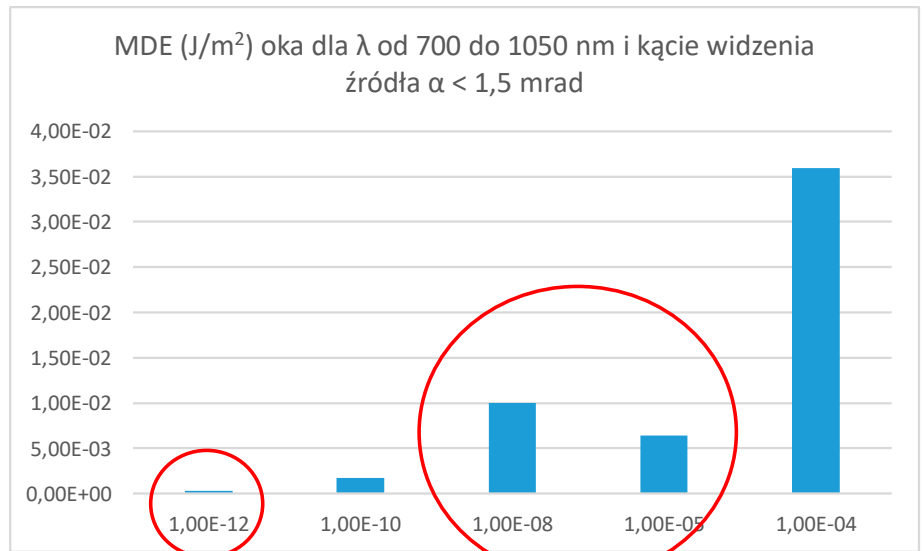
Ze wzorów od (3) do (6) widać, że w zależności od przedziału czasu ekspozycji we wzorach na MDE, rzeczywisty czas ekspozycji jest lub nie jest uwzględniany. Na rys. 3. przedstawiono wykres obrazujący, jak zmieniają się wartości MDE oka w odniesieniu do zakresu długości fal 700–1050 nm, przy kącie widzenia źródła  $\alpha < 1,5$  mrad w zależności od czasu ekspozycji z przedziału  $10^{-13}$ – $10$  s. Czerwonymi okręgami wyróżniono wartości MDE, do wyznaczania których nie uwzględnia się rzeczywistego czasu ekspozycji, a jedynie współczynniki korekcyjne.

Zaprezentowane powyżej przykłady pokazują jedynie sposób, w jaki wyliczane są wartości MDE. W ocenie ryzyka związanego z narażeniem człowieka na przypadkową ekspozycję promieniowania laserowego należy określić MDE oka i skóry w odniesieniu do następujących warunków:

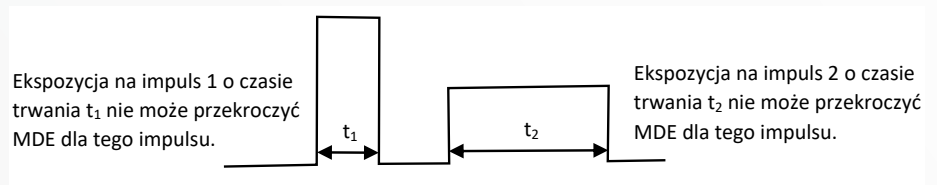
- zagrożenie pojedynczym impulsem
- zagrożenie ciągiem impulsów
- zagrożenie termiczne ciągiem impulsów, których oddziaływanie ma charakter addytywny.

W przypadku zagrożenia pojedynczym impulsem należy określić wartość MDE na pojedynczy impuls promieniowania laserowego ( $MDE_{poj}$ ). Jeśli promieniowanie laserowe ma charakter impulsowy, w którym impulsy mogą mieć inną charakterystykę czasową oraz moc szczytową, to ekspozycja na dowolny pojedynczy impuls w całym ciągu impulsów nie może przekraczać  $MDE_{poj}$  o tym czasie trwania impulsu. Sytuację tę przedstawiono na rys. 4.

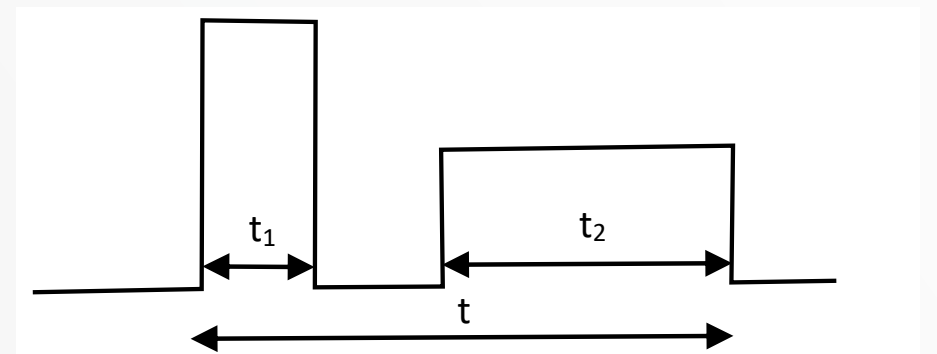
W przypadku zagrożenia ciągiem impulsów w czasie trwania ekspozycji należy określić MDE na ciąg impulsów w całym czasie trwania ekspozycji. Ekspozycja na dowolną grupę impulsów (lub podgrupę impulsów w ciągu impulsów) dostarczonych w czasie ekspozycji nie może przekraczać MDE w odniesieniu do tego czasu trwania ekspozycji. Sytuację tę przedstawia schemat na rys. 5. W przypadku zagrożenia ciągiem impulsów, któ-



Rys. 3. MDE oka dla długości fal z zakresu 700-1050 nm i czasu trwania ekspozycji  $10^{-13}$ – $10$  s. Czerwonymi okręgami wyróżniono wartości MDE, do wyznaczania których nie uwzględnia się rzeczywistego czasu ekspozycji, a jedynie współczynniki korekcyjne (na podstawie symulacji przeprowadzonej przez autorów)  
 Fig. 3. MDE of the eye for wavelength range 700 - 1050 nm and exposure time  $10^{-13}$  - 10 s. Red circles highlight the MDE value, the determination of which does not take into account the actual exposure time, but only correction factors (based on the simulation conducted by the authors)



Rys. 4. Zagrożenie pojedynczym impulsem (impulsem 1 lub 2), (CIOP-PIB)  
 Fig. 4. Single pulse hazard (pulse 1 or 2), (CIOP-PIB)



### Ekspozycja na impuls 1 i 2 w czasie trwania ekspozycji t nie może przekroczyć MDE dla tego czasu ekspozycji

Rys. 5. Zagrożenie ciągiem impulsów (impulsem 1 i 2), (CIOP-PIB)  
 Fig. 5. Pulse train hazard (pulse 1 and 2), (CIOP-PIB)

rych oddziaływanie ma charakter addytywny, należy określić wartość skumulowanego współczynnika korekcyjnego, który wyraża się wzorem:

$$C_p = N^{0,25} \text{ gdzie: (7)}$$

$C_p$  – skumulowany współczynnik korekcyjny,  
 $N$  – liczba impulsów w czasie trwania ekspozycji.

Następnie wyznacza się wartość wynikową  $MDE_T$  ze wzoru:

$$MDE_T = C_p \cdot MDE_{poj} \text{ gdzie: (8)}$$

$MDE_T$  – wartość wynikowa MDE,  
 $C_p$  – skumulowany współczynnik korekcyjny,  
 $MDE_{poj}$  – wartość MDE pojedynczego impulsu.

W obliczeniach MDE w przypadku zagrożeń ciągiem impulsów, których oddziaływanie ma charakter addytywny, istotny jest również minimalny czas trwania pojedynczego impulsu. Gdy czas trwania pojedynczego impulsu jest krótszy niż

czas minimalny, który jest określony w odniesieniu do danej długości fali (jest to czas  $T_{min}$ ), należy do obliczeń użyć właśnie tej wartości. W przypadku, gdy czas pojedynczego impulsu jest dłuższy niż czas  $T_{min}$ , należy w obliczeniach uwzględnić rzeczywisty czas trwania impulsu. Wartości czasu  $T_{min}$  w odniesieniu do poszczególnych zakresów widmowych przedstawiono w tab. 2.

### Znaczenie wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji w ocenie ryzyka zawodowego

Wiedza na temat MDE ma fundamentalne znaczenie w procesie analizy zagrożeń wywołanych promieniowaniem laserowym, a więc, w konsekwencji, w kontekście oceny zagrożeń wywołanych tym promieniowaniem. Promieniowanie optyczne, w tym również laserowe, może być klasyfikowane jako czynnik szkodliwy. Pracodawca nie rozpatruje jednak promieniowania jako czynnika szkodliwego dla zdrowia, jeśli w trakcie eksploatacji źródła promieniowania zgodnie z jego przeznaczeniem poziom ekspozycji nie przekracza wartości  $0,4 \cdot MDE$ .

Zgodnie z obowiązującymi przepisami brak konieczności rozpatrywania promieniowania laserowego jako czynnika szkodliwego dla zdrowia dotyczy przypadku, gdy eksploatuje się lasery klasy 1, 1M, 2 lub 3R zgodnie z wymaganiami określonymi przez producenta oraz podczas eksploatacji laserów klasy 3B i 4, do których zostały zastosowane środki bezpieczeństwa pozwalające na zaklasyfikowanie tych urządzeń do klasy 1 [10, 11]. Urządzenia laserowe wykorzystywane są jednak również w sposób, przy którym nie ma możliwości całkowitej eliminacji promieniowania (w szczególności promieniowania rozproszonego), na które może w niekontrolowany sposób być narażony człowiek. Dotyczy to takich czynności na stanowisku pracy, jak np. spawanie laserowe lub zabiegi fizjoterapeutyczne z wykorzystaniem promieniowania laserowego. W drugim wymienionym przykładzie w sposób oczywisty promieniowanie laserowe o dawkach znacznie przekraczających MDE, wymaganych do uzyskania określonego efektu terapeutycznego, może oddziaływać na skórę pacjenta. Nie oznacza to jednak, że promieniowania laserowego nie należy w tym przypadku rozpatrywać jako czynnika szkodliwego dla zdrowia. Znajomość wartości MDE konieczna jest w omawianym przykładzie również do określenia oznaczenia (stopnia ochrony) filtrów stosowanych w okularach lub goglach chroniących przed promieniowaniem laserowym. Tego typu środki ochrony indywidualnej muszą być bezwzględnie stosowane zarówno przez personel, jak również pacjentów. Widmowa gęstość optyczna filtrów chroniących przed promieniowaniem laserowym o danej długości fali wyznaczana jest ze wzoru:

Rys. 7. Przykładowy zrzut ekranu arkusza do wyliczania MDE dla promieniowania z zakresu długości fal 400 – 700 nm (CIOP-PIB)  
Fig. 7. Exemplary screenshot of the sheet for calculating MDE for radiation in the wavelength range 400-700 nm (CIOP-PIB)

Tabela 2. Wartości czasu  $T_{min}$  dla poszczególnych zakresów widmowych [9]  
Table 2. Tmin time values for individual spectral ranges [9]

Zakres widmowy (nm)	Wartość $T_{min}$ (s)
$315 < \lambda \leq 400$	$10^{-9}$
$400 < \lambda \leq 1050$	$18 \cdot 10^{-6}$
$1050 < \lambda \leq 1400$	$5 \cdot 10^{-6}$
$1400 < \lambda \leq 1500$	$10^{-3}$
$1500 < \lambda \leq 1800$	10
$1800 < \lambda \leq 2600$	$10^{-3}$
$2600 < \lambda \leq 10^6$	$10^{-7}$

$$OD_{\lambda} = \log_{10} \frac{H_0}{MDE} \text{ gdzie:} \quad (9)$$

$OD_{\lambda}$  – widmowa gęstość optyczna filtra chroniącego przed promieniowaniem laserowym,  
 $H_0$  – spodziewany poziom ekspozycji niechronionego oka,  
 MDE – maksymalna dopuszczalna ekspozycja.

Ze wzoru (9) w sposób jednoznaczny wynika, że wszędzie tam, gdzie występuje zagrożenie ekspozycji oka promieniowaniem laserowym w warunkach, w których konieczne jest stosowanie środków ochrony oczu w postaci okularów lub gogli chroniących przed promieniowaniem laserowym, konieczna jest znajomość wartości natężenia napromienienia lub napromienienia w warunkach rzeczywistej ekspozycji, jak również wartości MDE w odniesieniu do promieniowania laserowego stanowiącego potencjalne zagrożenie. Bez znajomości tych wartości nie jest możliwe prawidłowe określenie oznaczenia (stopnia ochrony) wymaganych w danych warunkach filtrów chroniących przed promie-

niowaniem laserowym. Na rys. 6. przedstawiono schemat obrazujący kolejność działań niezbędnych do określenia oznaczenia, jakie powinno znajdować się na okularach przeznaczonych do ochrony przed promieniowaniem laserowym.

W przypadku, gdy przekroczone są wartości MDE, pracodawca zobowiązany jest do wydzielenia strefy z takimi miejscami i ograniczenia do nich dostępu, jeśli jest to technicznie możliwe. Konieczne jest również poinformowanie pracowników o fakcie przekroczenia w danych miejscach wartości MDE oraz o potencjalnym ryzyku z tym związanym. Do informacji tych należy zaliczyć m.in. przyczyny powstawania chorób powodowanych ekspozycją na promieniowanie optyczne, ich objawy i sposoby wykrywania (również profilaktyczne badania lekarskie).

Mając na względzie znaczenie wiedzy o wartościach MDE, w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym przygotowano narzędzie pozwalające na wyliczenie wartości MDE w odniesieniu do promie-

Wzrostających i innych parametrów obliczeniowych (Rozporządzenie w sprawie kodowych dla zdrowia w środowisku pracy z dn. 6 czerwca 2014 r., tabela 11)

Zakres widmowy Długość fali lasera

długości fali mniejszych niż 700 nm i dla zakresu (700 - 1050) nm	850
długości fali (1050 - 1400) nm	
długości fali (400 - 450) nm i dla zakresu (450 - 700) nm	500
długości fali (700 - 1150) nm i dla zakresu (1150 - 1200) nm	1100
długości fali (1200 - 1400) nm	
fali mniejszych niż 400 nm i dla zakresu (450 - 500) nm	480
fali większych niż 500 nm	
Zakres kątowy Kąt widzenia	

niowania laserowego o założonych, dowolnie określonych parametrach energetycznych i geometrycznych. Narzędzie to składa się z 14 arkuszy kalkulacyjnych, pozwalających na automatyczne wyliczenie wartości MDE po wprowadzeniu danych odnoszących się do parametrów promieniowania laserowego. Na rys. 7. przedstawiono przykładowy zrzut ekranu arkusza do wyliczenia MDE w odniesieniu do promieniowania z zakresu długości fal 400–700 nm.

## Podsumowanie

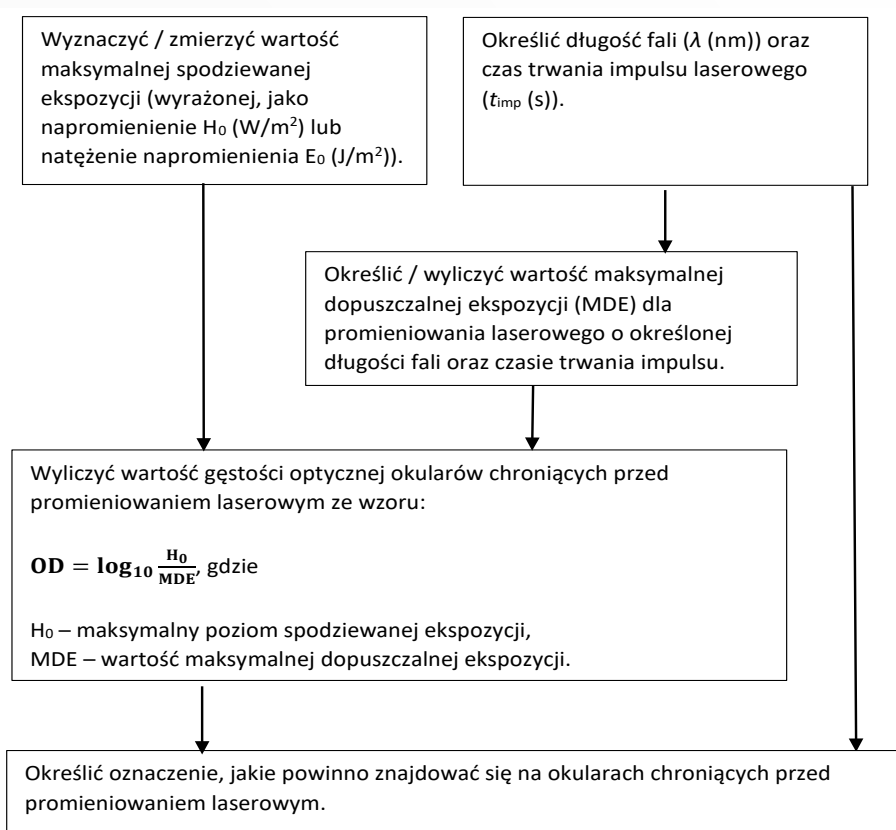
Opisany w artykule sposób wyznaczania i wyliczania wartości MDE ma na celu ułatwienie osobom odpowiedzialnym za bezpieczeństwo obsługi urządzeń laserowych przeprowadzenia analizy zagrożeń i oceny ryzyka zawodowego związanego z oddziaływaniem szkodliwego promieniowania laserowego. Znajomość wartości MDE jest w tym przypadku jednym z kluczowych elementów.

Opracowane w CIOP-PIB narzędzie pozwala również na wyznaczenie wartości przekroczenia krotności MDE w zadanej odległości od źródła wiązki o określonej rozbieżności oraz odległości, w której rzeczywista wartość natężenia na promieniowanie lub napromienienie zrównają się z wartością MDE.

Opracowane narzędzie uwzględnia wszystkie wymagane elementy, które należy brać pod uwagę w procedurze wyznaczania MDE, czyli:

- długość fali promieniowania laserowego,
- czas ekspozycji na promieniowanie laserowe,
- rodzaj ekspozycji tkanki (oko lub skóra), oraz
- rodzaj zagrożenia wynikającego z zakresu widmowego promieniowania laserowego (zagrożenia fotochemiczne lub termiczne).

Narzędzie to udostępniane jest uczestnikom szkoleń z zakresu bezpiecznej obsługi urządzeń laserowych, organizowanych przez Centrum Edukacyjne CIOP-PIB. Symulacje przeprowadzone z wykorzystaniem tego narzędzia są również uwzględnione w pracach nad symulatorem wybranych urządzeń laserowych z wykorzystaniem technologii rzeczywistości wirtualnej (VR)



Rys. 6. Kolejność postępowania do określenia oznaczenia, jakie powinno znajdować się na okularach chroniących przed promieniowaniem laserowym (CIOP-PIB)

Fig. 6. The sequence of proceedings to determine the mark that should be on the glasses protecting against laser radiation (CIOP-PIB)

do przeprowadzenia szkoleń z zakresu bhp przy ich obsłudze.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] OW CZAREK, G. Materiały do szkoleń z zakresu bezpieczeństwa przy obsłudze urządzeń laserowych. CIOP-PIB, Warszawa 2019.
- [2] WOLSKA, A., GŁOGOWSKI, P. Nowe kryteria oceny zagrożeń zdrowia wynikające z niezamierzonej ekspozycji na promieniowanie laserowe [New criteria for the assessment of health hazards resulting from unintentional exposure to laser radiation]. Biuletyn WAT 2009, Vol. LVIII, 4: 351-367.
- [3] MAIMAN, T.H. Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby, Phys. Rev. 1960, Lett. 4, 564.
- [4] SLINEY, D.H. Radiation safety. The maximum permissible exposure levels: our knowledge of the hazards, Optics & Laser Technology 1989, 21(4): 235-240.
- [5] CORDER D.A., EVANS D.R., TYRER, J.R. An improved maximum permissible exposure meter for safety assessments of laser radiation, Optics and Lasers in Engineering, 1997, 28, (6): 423-442.
- [6] De LUCA, D., DELFINO, I. LEPORE, M. Laser Safety Standards and Measurements of Hazard Parameters for Medical Lasers, International Journal of Optics and Applications 2012, 2(6): 80-86DOI: 10.5923/j.optics.20120206.01.
- [7] PN-EN 60825-1: 2014 Bezpieczeństwo urzą-

żeń laserowych – Część 1: Klasyfikacja sprzętu i wymagania.

[8] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 25/2006/WE z dnia 5 lipca 2006 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztuczne promieniowanie optyczne).

[9] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.

[10] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 maja 2010 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z ekspozycją na promieniowanie optyczne.

[11] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.