

*dr inż. AGNIESZKA WOLSKA,
mgr inż. PIOTR KONIECZNY
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa
ul. Czerniakowska 16*

Porównanie kryteriów oceny zagrożenia i wartości granicznych ekspozycji na promieniowanie laserowe obowiązujących w Polsce oraz w dyrektywie 2006/25/EU

Słowa kluczowe: promieniowanie laserowe, kryteria oceny zagrożenia zdrowia promieniowaniem laserowym, maksymalne dopuszczalne ekspozycje.

Key words: Laser radiation, hazard evaluation criteria of laser radiation, maximum permissible exposures.

W artykule przedstawiono porównanie kryteriów oceny zagrożenia na promieniowanie laserowe zawartych w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z 29 listopada 2002 r. oraz dyrektywie Unii Europejskiej. W celu porównania dokonano obliczeń maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji i wartości granicznych ekspozycji na promieniowanie laserowe dla długości fali i czasów trwania impulsów laserowych losowo wybranych spośród wszystkich rodzajów promieniowania laserowego, powodujących uszkodzenia oka i skóry. Na podstawie obliczeń autorzy podjęli próbę rozstrzygnięcia, w którym dokumencie zawarte są bardziej rygorystyczne kryteria.

KRYTERIA I WYKAZ MAKSYMALNYCH DOPUSZCZALNYCH EKSPOZYCJI NA PROMIENIOWANIE LASEROWE, ZAWARTE W ROZPORZĄDZENIU MINISTRA PRACY I POLITYKI SPOŁECZNEJ

W rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy najwyższy poziom promieniowania laserowego niepowodujący obrażeń oczu i skóry jest określany jako maksymalna dopuszczalna ekspozycja – MDE. Ustalone wartości MDE na promieniowanie laserowe odnoszą się do przypadkowego, krótkotrwałego narażenia człowieka na to promieniowanie, a nie do zamierzonych ekspozycji dla celów medycznych, rehabilitacyjnych czy optycznej tomografii komputerowej (OCT). Ekspozycja na promieniowanie lase-

rowe, którego parametry przekraczają ustalone wartości MDE, wskazuje na duże ryzyko zawodowe, co jest równoznaczne ze szkodliwym skutkiem dla zdrowia człowieka. Działanie promieniowania laserowego na tkankę ma różny charakter w zależności od gęstości mocy promieniowania i od czasu ekspozycji.

Wartości MDE są odniesione do:

- długości fali promieniowania laserowego
- czasu trwania impulsu laserowego lub czasu trwania ekspozycji
- rodzaju tkanki narażonej na obrażenie
- charakteru ekspozycji (bezpośrednie patrzenie w wiązkę promieniowania lub patrzenie na promieniowanie rozproszone)
- rozmiaru obrazu na siatkówce oka, w przypadku promieniowania w zakresie $400 \div 1400$ nm.

W związku z powyższym wartości MDE są bardzo zróżnicowane i w rozporządzeniu zostały zestawione w trzech tabelach: dwie tabele zawierają dane odnoszące się do oka (tabela 1 – dla źródeł punktowych, tabela 2 – dla źródeł rozciągniętych), a jedna tabela (tabela 3) dotyczy skóry.

W przypadku źródeł laserowych emitujących promieniowanie impulsowe powtarzalne lub promieniowanie zmodulowane, maksymalną dopuszczalną ekspozycję oka i skóry określają następujące warunki:

- ekspozycja na dowolny pojedynczy impuls w ciągu impulsów nie powinna przekraczać wartości dozwolonych dla pojedynczego impulsu, podanych w tabelach 1, 2 i 3
- średnia ekspozycja dla ciągu impulsów o czasie trwania T nie powinna przekraczać wartości dozwolonych dla ekspozycji o czasie trwania T , podanych w tabelach 1, 2 i 3
- dla promieniowania laserowego o długości fali zawartej w przedziale $400 \div 1400$ nm powinien być spełniony dodatkowo następujący warunek:
- maksymalna dozwolona ekspozycja na dowolny pojedynczy impuls z ciągu impulsów (MDE_{imp}) nie powinna przekraczać wartości MDE miarodajnej dla pojedynczego impulsu, podanej w tabelach 1, 2 i 3, pomnożonej przez liczbę impulsów (N) działających na oczy lub skórę, podniesioną do potęgi minus 1/4:

$$MDE_{imp} = MDE (N)^{-1/4}$$

Tabela 1.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) oka na promieniowanie laserowe źródeł punktowych (patrzenie w wiązkę)

Czas ekspozycji t, s	$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$	$10^{-6} \div$ $\div 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} \div$ $\div 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} \div$ $\div 10$	$10 \div 10^3$	$10^3 \div$ $\div 10^4$	$10^4 \div 3 \cdot 10^4$	
180 ÷ 302,5		$30 J \cdot m^{-2}$								
302,5 ÷ 315	$3 \cdot 10^{10} W \cdot m^{-2}$	$C_1 J \cdot m^{-2}$ $t < T_1$				$C_2 J \cdot m^{-2}$ $t > T_1$		$C_2 J \cdot m^{-2}$		
315 ÷ 400		$C_1 J \cdot m^{-2}$						$10^4 J \cdot m^{-2}$	$10 W \cdot m^{-2}$	
400 ÷ 550	$5 \cdot 10^6 W \cdot m^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3} J \cdot m^{-2}$			$18 \cdot t^{0,75} J \cdot m^{-2}$			$100 J \cdot m^{-2}$	$10^2 W \cdot m^{-2}$	
550 ÷ 700		$C_3 \cdot 10^2 J \cdot m^{-2}$ $t > T_2$		$C_3 \cdot 10^2 W \cdot m^{-2}$						
700 ÷ 1050	$5 \cdot C_4 \cdot 10^6 W \cdot m^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3} \cdot C_4 J \cdot m^{-2}$			$18 \cdot C_4 \cdot t^{0,75} J \cdot m^{-2}$			$3,2 \cdot C_4 W \cdot m^{-2}$		
1050 ÷ 1400	$5 \cdot 10^7 W \cdot m^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} J \cdot m^{-2}$				$90 \cdot t^{0,75} J \cdot m^{-2}$		$16 W \cdot m^{-2}$		
1400 ÷ 1530	$10^{11} W \cdot m^{-2}$	$100 J \cdot m^{-2}$	$5600 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2}$				$1000 W \cdot m^{-2}$			
1530 ÷ 1550		$1,0 \cdot 10^4 J \cdot m^{-2}$	$5600 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2}$							
1550 ÷ 10^6		$100 J \cdot m^{-2}$	$5600 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2}$							

Tabela 2.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) oka na promieniowanie laserowe źródeł rozciągniętych

Czas ekspozycji t, s	$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$	$10^{-6} \div 10$	$10 \div 10^3$	$10^3 \div$ $\div 10^4$	$10^4 \div 3 \cdot 10^4$
180 ÷ 302,5		$30 J \cdot m^{-2}$					
302,5 ÷ 315	$3 \cdot 10^{10} W \cdot m^{-2}$	$C_1 J \cdot m^{-2}$ $t < T_1$			$C_2 J \cdot m^{-2}$ $t > T_1$		$C_2 J \cdot m^{-2}$
315 ÷ 400		$C_1 J \cdot m^{-2}$				$10^4 J \cdot m^{-2}$	$10 W \cdot m^{-2}$
400 ÷ 550	$10^{11} W \cdot m^{-2} sr^{-1}$	$10^5 \cdot t^{0,33} J \cdot m^{-2} sr^{-1}$			$2,1 \cdot 10^5 J \cdot m^{-2} sr^{-1}$		$21 W \cdot m^{-2} sr^{-1}$
550 ÷ 700					$2,1 \cdot C_3 \cdot 10^5 J \cdot m^{-2} sr^{-1}$ $t > T_2$		$21 \cdot C_3 W \cdot m^{-2} sr^{-1}$
700 ÷ 1050	$10^{11} \cdot C_4 W \cdot m^{-2} sr^{-1}$	$10^5 \cdot C_4 \cdot t^{0,33} J \cdot m^{-2} sr^{-1}$			$3,8 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t^{0,75} J \cdot m^{-2} sr^{-1}$		$6,4 \cdot 10^3 \cdot C_4 W \cdot m^{-2} sr^{-1}$
1050 ÷ 1400	$5 \cdot 10^{11} W \cdot m^{-2} sr^{-1}$	$5 \cdot 10^5 \cdot t^{0,33} J \cdot m^{-2} sr^{-1}$			$1,9 \cdot 10^5 \cdot t^{0,75} J \cdot m^{-2} sr^{-1}$		$3,2 \cdot 10^4 W \cdot m^{-2} sr^{-1}$
1400 ÷ 1530	$10^{11} W \cdot m^{-2}$	$100 J \cdot m^{-2}$	$5600 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2}$				$1000 W \cdot m^{-2}$
1530 ÷ 1550		$1,0 \cdot 10^4 J \cdot m^{-2}$	$5600 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2}$				
1550 ÷ 10^6		$100 J \cdot m^{-2}$	$5600 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2}$				

Tabela 3.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) skóry na promieniowanie laserowe

Czas ekspozycji t, s	$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10$	$10 \div 10^3$	$10^3 \div 3 \cdot 10^4$
	Długość fali λ, nm				
180 ÷ 302,5		$30 J \cdot m^{-2}$			
302,5 ÷ 315	$3 \cdot 10^{10} W \cdot m^{-2}$	$C_1 J \cdot m^{-2}$ $t < T_1$		$C_2 J \cdot m^{-2}$ $t > T_1$	
315 ÷ 400		$C_1 J \cdot m^{-2}$		$10^4 J \cdot m^{-2}$	$10 W \cdot m^{-2}$
400 ÷ 1400	$2 \cdot 10^{11} W \cdot m^{-2}$	$200 J \cdot m^{-2}$	$1,1 \cdot 10^4 t^{0,25} J \cdot m^{-2}$	$2000 W \cdot m^{-2}$	
1400 ÷ 10^6	$10^{11} W \cdot m^{-2}$	$100 J \cdot m^{-2}$	$5600 t^{0,25} J \cdot m^{-2}$	$1000 W \cdot m^{-2}$	

Wartości współczynników korekcyjnych stosowanych w tabelach 1÷3 przedstawiono w tabeli 4, zaś wartości kąta granicznego niezbędne przy klasyfikowaniu lasera jako źródła punktowego lub rozciągniętego, przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 4.

Współczynniki korekcyjne

Parametr	Zakres widmowy
$C_1 = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$	302,5 ÷ 400
$T_1 = 10^{0,8(\lambda-296)} \cdot 10^{-15} s$	302,5 ÷ 315
$C_2 = 10^{0,2(\lambda-295)}$	302,5 ÷ 315
$T_2 = 10 \cdot 10^{0,02(\lambda-550)} s$	550 ÷ 700
$C_3 = 10^{0,015(\lambda-550)}$	550 ÷ 700
$C_4 = 1^{(\lambda-700)/500}$	700 ÷ 1050

Tabela 5.

Wartość kąta granicznego α_{min}

Parametr	Czas ekspozycji, s
$\alpha_{min} = 0,008 \text{ rad}$	$< 10^{-9}$
$\alpha_{min} = 0,00025 \cdot t^{-0,17} \text{ rad}$	$10^{-9} \div 1,8 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_{min} = 0,015 \cdot t^{0,21} \text{ rad}$	$1,8 \cdot 10^{-5} \div 10$
$\alpha_{min} = 0,024 \text{ rad}$	> 10

Uwaga: dla $1050 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1400 \text{ nm}$ i dla $t < 5 \cdot 10^{-5} s$, α_{min} należy zwiększyć 1,4 razy.

KRYTERIA I WYKAZ WARTOŚCI GRANICZNYCH EKSPOZYCJI NA PROMIENIOWANIE LASEROWE, ZAWARTE W DYREKTYWIE 2006/25/EU DOTYCZĄCEJ PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO

W dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa, dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi, najwyższy poziom promieniowania laserowego niepowodujący obrażeń oczu i skóry jest określany jako wartość graniczna ekspozycji oka lub skóry na promieniowanie laserowe. Ustalone wartości graniczne ekspozycji na promieniowanie laserowe odnoszą się do przypadkowego, krótkotrwałego narażenia człowieka na to promieniowanie, a nie do zamierzonych ekspozycji dla celów medycznych, rehabilitacyjnych czy optycznej tomografii komputerowej (OCT). Ekspozycja na promieniowanie laserowe, którego parametry przekraczają ustalone wartości graniczne, wskazuje na duże ryzyko zawodowe, co jest równoznaczne ze szkodliwym skutkiem dla zdrowia człowieka.

Działanie promieniowania laserowego na tkankę ma różny charakter w zależności od gęstości mocy promieniowania i od czasu ekspozycji. Rodzaje zagrożeń dla oka i skóry, powodowanych przez promieniowanie laserowe w zależności od długości fali promieniowania, przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6.
Zagrożenia związane z promieniowaniem

Zakres promieniowania	Długość fali λ , nm	Zagrożony narząd	Rodzaj zagrożenia	Numer tabeli wartości granicznych ekspozycji
UV	180 ÷ 400	oko	uszkodzenie fotochemiczne i termiczne	7, 8
UV	180 ÷ 400	skóra	rumień	9
VIS	400 ÷ 700	oko	uszkodzenie siatkówki	7
VIS	400 ÷ 600	oko	uszkodzenie fotochemiczne	8
VIS	400 ÷ 700	skóra	uszkodzenie termiczne	9
IR-A	700 ÷ 1 400	oko	uszkodzenie termiczne	7, 8
IR-A	700 ÷ 1 400	skóra	uszkodzenie termiczne	9
IR-B	1 400 ÷ 2 600	oko	uszkodzenie termiczne	7
IR-C	2 600 ÷ 10 ⁶	oko	uszkodzenie termiczne	7
IR-B, IR-C	1 400 ÷ 10 ⁶	oko	uszkodzenie termiczne	8
IR-B, IR-C	1 400 ÷ 10 ⁶	skóra	uszkodzenie termiczne	9

Wartości graniczne ekspozycji oka lub skóry na promieniowanie laserowe są odniesione do:

- długości fali promieniowania laserowego
- czasu trwania impulsu laserowego lub czasu trwania ekspozycji
- rodzaju tkanki narażonej na obrażenie
- charakteru ekspozycji
- rozmiaru obrazu na siatkówce oka.

W związku z powyższym wartości graniczne ekspozycji oka i skóry na promieniowanie laserowe są bardzo zróżnicowane i w dyrektywie zestawione są w trzech tabelach. Dwie tabele zawierają wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji oka: dla krótkich czasów trwania ekspozycji, poniżej 10 s (tabela 7) i dla długich czasów trwania ekspozycji, większych od 10 s (tabela 8). Natomiast jedna tabela (tabela 9) zawiera wartości graniczne ekspozycji skóry. W tabelach wartości granicznych ekspozycji oka lub skóry na promieniowanie laserowe (tabele 7÷9) przyjęto następujące oznaczenia:

- *E*, natężenie napromienienia lub gęstość mocy (strumień promienisty (energetyczny) padający na elementarną powierzchnię) wyrażone w watach na metr kwadratowy [$W \cdot m^{-2}$]; wartości $E(t)$, E pochodzą z pomiarów lub mogą być podane przez producenta sprzętu

- *H*, napromienienie (całka natężenia napromienienia liczona dla danego czasu ekspozycji) wyrażone w dżulach na metr kwadratowy [$J \cdot m^{-2}$]

- *G*, zintegrowana luminancja energetyczna (całka luminancji energetycznej w danym czasie ekspozycji) wyrażona jako energia promieniowania z jednostki powierzchni promieniującej w jednostkowym kącie bryłowym emisji, w dżulach na metr kwadratowy na steradian [$J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$].

Współczynniki korekcyjne stosowane w tabelach 7÷9 przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 7.

Wartości graniczne ekspozycji oka na promieniowanie laserowe – krótki czas trwania ekspozycji < 10 s

Długość fali ^{a)} , nm		Apertura	Czas trwania, s						
			$10^{-13} \div 10^{-11}$	$10^{-11} \div 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 1.8 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} \div 10^{-3}$	$10^{-3} \div 10^1$
UV-C	180 ÷ 280	1 mm dla $t < 0,3$ s; $1,5 \cdot t^{0,375}$ dla $0,3 < t < 10$ s	$E = 3 \cdot 10^{10} \cdot W m^{-2} c)$						
UV-B	280 ÷ 302								$H = 30 J m^{-2}$
	303								$H = 40 J m^{-2}$ jeżeli $t < 2,6 \cdot 10^{-9}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	304								$H = 60 J m^{-2}$ jeżeli $t < 1,3 \cdot 10^{-8}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	305								$H = 100 J m^{-2}$ jeżeli $t < 1,0 \cdot 10^{-7}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	306								$H = 160 J m^{-2}$ jeżeli $t < 6,7 \cdot 10^{-7}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	307								$H = 250 J m^{-2}$ jeżeli $t < 4,0 \cdot 10^{-6}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	308								$H = 400 J m^{-2}$ jeżeli $t < 2,6 \cdot 10^{-5}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	309								$H = 630 J m^{-2}$ jeżeli $t < 1,6 \cdot 10^{-4}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	310								$H = 10^3 J m^{-2}$ jeżeli $t < 1,0 \cdot 10^{-3}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	311								$H = 1,6 \cdot 10^3 J m^{-2}$ jeżeli $t < 6,7 \cdot 10^{-3}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	312								$H = 2,5 \cdot 10^3 J m^{-2}$ jeżeli $t < 4,0 \cdot 10^{-2}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	313								$H = 4,0 \cdot 10^3 J m^{-2}$ jeżeli $t < 2,6 \cdot 10^{-1}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
	314								$H = 6,3 \cdot 10^3 J m^{-2}$ jeżeli $t < 1,6 \cdot 10^0$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2} d)$
UV-A	315 ÷ 400	$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}, J m^{-2}$							
VIS i IR-A	400 ÷ 700	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_E, J m^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_E, J m^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_E, J m^{-2}$	$H = 18 \cdot t^{0,75} C_E, J m^{-2}$				
	700 ÷ 1 050	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_A C_E, J m^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_A C_E, J m^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_A C_E, J m^{-2}$	$H = 18 \cdot t^{0,75} C_A C_E, J m^{-2}$				
	1 050 ÷ 1 400	$H = 1,5 \cdot 10^{-3} C_C C_E, J m^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^5 t^{0,75} C_C C_E, J m^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-2} C_C C_E, J m^{-2}$	$H = 90 \cdot t^{0,75} C_C C_E, J m^{-2}$				
IR-B i IR-C	1 400 ÷ 1 500	$E = 10^{12} W m^{-2} c)$	$H = 10^3 J m^{-2}$		$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}, J m^{-2}$				
	1 500 ÷ 1 800	$E = 10^{13} W m^{-2} c)$	$H = 10^4 J m^{-2}$						
IR-C	1 800 ÷ 2 600	$E = 10^{12} W m^{-2} c)$	$H = 10^3 J m^{-2}$		$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}, J m^{-2}$				
	2 600 ÷ 10^6	$E = 10^{11} W m^{-2} c)$	$H = 100 J m^{-2}$	$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}, J m^{-2}$					

a) Jeżeli dla danej długości fali promieniowania laserowego istnieją dwie wartości graniczne, stosuje się wartość graniczną bardziej restrykcyjną.

b) Gdy $1\ 400 \leq \lambda < 10^5$ nm: średnica apertury = 1 mm dla $t \leq 0,3$ s i $1,5 t^{0,375}$ mm dla $0,3 < t < 10$ s; gdy $10^5 \leq \lambda < 10^6$ nm: średnica apertury = 11 mm.

c) Ze względu na brak danych dla tych długości impulsów, ICNIRP (Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym) zaleca korzystanie z wartości granicznych natężenia napromienienia wyznaczonych dla 1 ns.

^{d)} Tabela zawiera wartości dla pojedynczych impulsów laserowych. W przypadku wielokrotnych impulsów laserowych, czasy trwania impulsów należących do przedziału T_{min} (wymienione w tabeli 11) należy dodać, a będącą wynikiem wartość czasu należy podstawić w miejsce t we wzorze: $5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$.

Tabela 8.

Wartości graniczne ekspozycji oka na promieniowanie laserowe – długi czas trwania ekspozycji ≥ 10 s

Długość fali ^{a)} , nm		Apertura	Czas trwania, s		
			$10^1 \div 10^2$	$10^2 \div 10^4$	$10^4 \div 3 \cdot 10^4$
UV-C	180 ÷ 280	3,5 mm	$H = 30 \text{ J m}^{-2}$		
UV-B	280 ÷ 302		$H = 40 \text{ J m}^{-2}$		
	303		$H = 60 \text{ J m}^{-2}$		
	304		$H = 100 \text{ J m}^{-2}$		
	305		$H = 160 \text{ J m}^{-2}$		
	306		$H = 250 \text{ J m}^{-2}$		
	307		$H = 400 \text{ J m}^{-2}$		
	308		$H = 630 \text{ J m}^{-2}$		
	309		$H = 1,0 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	310		$H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	311		$H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	312		$H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	313		$H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	314		$H = 10^4 \text{ J m}^{-2}$		
UV-A	315 ÷ 400	$H = 10^4 \text{ J m}^{-2}$			
VIS 400 ÷ 700	400 ÷ 600 fotochemiczne ^{b)} uszkodzenie siatkówki	7 mm	$H = 100 C_B, \text{ J m}^{-2}$ ($\gamma = 11 \text{ mrad}$) ^{d)}	$E = 1 C_B, \text{ W m}^{-2}; (\gamma = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad})$ ^{d)}	$E = 1 C_B \text{ W m}^{-2}$ ($\gamma = 110 \text{ mrad}$) ^{d)}
	400 ÷ 700 termiczne ^{b)} uszkodzenie siatkówki		jeżeli $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$, to $E = 10 \text{ W m}^{-2}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t \leq T_2$, to $H = 18 C_E t^{0,75} \text{ J m}^{-2}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t > T_2$, to $E = 18 C_E T_2^{-0,25}, \text{ W m}^{-2}$		
IR-A	700 ÷ 1 400	7 mm	jeżeli $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$, to $E = 10 C_A C_C \text{ W m}^{-2}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t \leq T_2$, to $H = 18 C_A C_C C_E t^{0,75} \text{ J m}^{-2}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t > T_2$, to $E = 18 C_A C_C C_E T_2^{-0,25}, \text{ W m}^{-2}$ (maksymalnie $1\,000 \text{ W m}^{-2}$)		
IR-B i IR-C	$1\,400 \div 10^6$	^{c)}	$E = 1\,000 \text{ W m}^{-2}$		

^{a)} Jeżeli dla danej długości fali promieniowania laserowego lub dla innej jego właściwości istnieją dwie wartości graniczne, stosuje się wartość graniczną bardziej restrykcyjną.

^{b)} Dla małych źródeł, których kąt widzenia wynosi co najwyżej 1,5 mrad, podwójne wartości graniczne ekspozycji E od 400 nm do 600 nm, w zakresie widzialnym, ograniczają się do termicznych wartości granicznych dla $10 \text{ s} \leq t < T_1$ oraz do fotochemicznych wartości granicznych dla dłuższych czasów. Dla określenia T_1 i T_2 patrz tabela 10. Zagrożenie fotochemiczne siatkówki oka może być wyrażone również poprzez zintegrowaną luminancję energetyczną $G = 106 C_B, \text{ J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, dla $t > 10 \text{ s}$ do $t = 10\,000 \text{ s}$ oraz poprzez luminancję energetyczną $L = 100 C_B, \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, dla $t > 10\,000 \text{ s}$. Przy pomiarze G i L γ_m należy zastosować jako uśrednione pole widzenia. Oficjalna granica pomiędzy promieniowaniem widzialnym a podczerwonym, określona przez CIE, wynosi 780 nm. Kolumna zawierająca nazwy zakresów długości fali ma jedynie zapewnić użytkownikowi lepszy ogólny przegląd. (Symbol G używany jest przez CEN; symbol L , używany jest przez CIE; symbol L_P używany jest przez IEC i CENELEC).

^{c)} Dla długości fali $1400 \div 10^5 \text{ nm}$: średnica apertury = 3,5 mm; dla długości fali $10^5 \div 10^6 \text{ nm}$: średnica apertury = 11 mm.

^{d)} Dla pomiaru wartości ekspozycji, uwzględnienie γ określone jest w następujący sposób: jeżeli α (kąt widzenia źródła) $> \gamma$ (stożkowy kąt ograniczający pomiarowe pole widzenia, wskazany w nawiasie w odpowiedniej kolumnie), to pomiarowe pole widzenia γ_m powinno przyjmować wartość γ . (Przy użyciu większego pomiarowego pola widzenia, zagrożenie byłoby przeszacowane). Jeżeli $\alpha < \gamma$, to pomiarowe pole widzenia γ_m musi być wystarczająco duże, by całkowicie obejmować źródło, ale nie jest ograniczone w żaden inny sposób i może być większe niż γ .

Tabela 9.**Wartości graniczne ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe**

Długość fali ^{a)} , nm		Apertura	Czas trwania, s					
			$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10^{-3}$	$10^{-3} \div 10^1$	$10^1 \div 10^3$	$10^3 \div 3 \cdot 10^4$
UV (A, B, C)	180÷400	3,5 mm	$E = 3 \cdot 10^{10}, \text{ W m}^{-2}$	Takie same jak wartości graniczne ekspozycji oka				
VIS i IR-A	400÷700	3,5 mm	$E = 2 \cdot 10^{11}, \text{ W m}^{-2}$	$H = 200 C_A$ J m^{-2}	$H = 1,1 \cdot 10^4 C_A t^{0,25},$ J m^{-2}	$E = 2 \cdot 10^3 C_A, \text{ W m}^{-2}$		
	700 ÷ 1 400		$E = 2 \cdot 10^{11} C_A, \text{ W m}^{-2}$					
IR-B i IR-C	1 400 ÷ 1 500		$E = 10^{12} \text{ W m}^{-2}$	Takie same jak wartości graniczne ekspozycji oka				
	1 500 ÷ 1 800		$E = 10^{13} \text{ W m}^{-2}$					
	1 800 ÷ 2 600	$E = 10^{12} \text{ W m}^{-2}$						
	2 600 ÷ 10^6	$E = 10^{11} \text{ W m}^{-2}$						

^{a)} Jeżeli dla danej długości fali promieniowania laserowego lub dla innej jego właściwości istnieją dwie wartości graniczne, stosuje się wartość graniczną bardziej restrykcyjną.

Tabela 10.

Stosowane współczynniki korekcyjne i inne parametry obliczeniowe

Parametr wg wykazu ICNIRP	Obowiązujący zakres widmowy, nm	Wartość
C_A	$\lambda < 700$	$C_A = 1,0$
	$700 \div 1\ 050$	$C_A = 10^{0,002(\lambda - 700)}$
	$1\ 050 \div 1\ 400$	$C_A = 5,0$
C_B	$400 \div 450$	$C_B = 1,0$
	$450 \div 700$	$C_B = 10^{0,02(\lambda - 450)}$
C_C	$700 \div 1\ 150$	$C_C = 1,0$
	$1\ 150 \div 1\ 200$	$C_C = 10^{0,018(\lambda - 1\ 150)}$
	$1\ 200 \div 1\ 400$	$C_C = 8,0$
T_1	$\lambda < 450$	$T_1 = 10\text{ s}$
	$450 \div 500$	$T_1 = 10 \cdot 10^{0,02(\lambda - 450)},\text{ s}$
	$\lambda > 500$	$T_1 = 100\text{ s}$
Parametr wg wykazu ICNIRP	obowiązujący dla skutków biologicznych	wartość
α_{\min}	wszystkie skutki termiczne	$\alpha_{\min} = 1,5\text{ mrad}$
Parametr wg wykazu ICNIRP	obowiązujący zakres kątowy, mrad	wartość
C_E	$\alpha < \alpha_{\min}$	$C_E = 1,0$
	$\alpha_{\min} < \alpha < 100$	$C_E = \alpha / \alpha_{\min}$
	$\alpha > 100$	$C_E = \alpha^2 / (\alpha_{\min} \alpha_{\max})\text{ mrad}$, gdzie $\alpha_{\max} = 100\text{ mrad}$
T_2	$\alpha < 1,5$	$T_2 = 10\text{ s}$
	$1,5 < \alpha < 100$	$T_2 = 10 \cdot 10^{(\alpha - 1,5) / 98,5},\text{ s}$
	$\alpha > 100$	$T_2 = 100\text{ s}$
Parametr wg wykazu ICNIRP	obowiązujący zakres czasu ekspozycji, s	wartość
γ	$t \leq 100$	$\gamma = 11\text{ mrad}$
	$100 < t < 10^4$	$\gamma = 1,1 t^{0,5},\text{ mrad}$
	$t > 10^4$	$\gamma = 110\text{ mrad}$

Do wszystkich ekspozycji powtarzalnych pochodzących z aparatury laserowej emitującej impulsy powtarzalne lub skanującej należy zastosować każdą z następujących trzech zasad ogólnych:

- ekspozycja na jakikolwiek pojedynczy impuls w obrębie ciągu impulsów nie może przekraczać wartości granicznych ekspozycji dla pojedynczego impulsu o tym czasie trwania impulsu
- ekspozycja na jakąkolwiek grupę impulsów (lub podgrupę impulsów w ciągu impulsów) dostarczonych w czasie t nie może przekraczać wartości granicznej ekspozycji dla czasu t
- ekspozycja na jakikolwiek pojedynczy impuls w obrębie grupy impulsów nie może przekraczać wartości granicznej ekspozycji dla pojedynczego impulsu, pomnożonej przez skumulowany termiczny współczynnik korekcyjny $C_p = N^{0,25}$, gdzie N oznacza liczbę impulsów; zasada ta ma zastosowanie jedynie do wartości granicznych ekspozycji mających na celu ochronę przed uszkodzeniem termicznym w przypadku, gdy wszystkie impulsy dostarczone w czasie mniejszym niż T_{\min} są traktowane jako pojedynczy impuls.

Wartości współczynników korekcyjnych dla ekspozycji powtarzalnych przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11.

Korekta dla ekspozycji powtarzalnych

Parametr	Obowiązujący zakres widmowy, nm	Wartość
T_{\min}	$315 < \lambda \leq 400$	$T_{\min} = 10^{-9}$ s (= 1 ns)
	$400 < \lambda \leq 1\ 050$	$T_{\min} = 18 \cdot 10^{-6}$ s (= 18 μ s)
	$1\ 050 < \lambda \leq 1\ 400$	$T_{\min} = 50 \cdot 10^{-6}$ s (= 50 μ s)
	$1\ 400 < \lambda \leq 1\ 500$	$T_{\min} = 10^{-3}$ s (= 1 ms)
	$1\ 500 < \lambda \leq 1\ 800$	$T_{\min} = 10$ s
	$1\ 800 < \lambda \leq 2\ 600$	$T_{\min} = 10^{-3}$ s (= 1 ms)
	$2\ 600 < \lambda \leq 10^6$	$T_{\min} = 10^{-7}$ s (= 100 ns)

PORÓWNANIE KRYTERIÓW OCENY ZAGROŻENIA I WARTOŚCI GRANICZNYCH EKSPOZYCJI NA PROMIENIOWANIE LASEROWE ZAWARTYCH W ROZPORZĄDZENIU ORAZ DYREKTYWIE 2006/25/UE

Dyrektywa UE powstała jako kompilacja kryteriów oceny zagrożenia, ustalonych i opublikowanych przez Międzynarodową Komisję ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym ICNIRP (2000) i w normie IEC 60825-1 (PN-EN 60825-1:2005), przy czym zostały one uzupełnione o wartości graniczne ekspozycji oczu dla czasów ekspozycji poniżej 10^{-9} s, co wynika z najnowszego stanu wiedzy związanego z postępem techniki laserowej. Dlatego też do porównania kryteriów oceny zagrożenia i wartości granicznych ekspozycji na promieniowanie laserowe wybrano dwa dokumenty: dyrektywę i obowiązujące w Polsce rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy. Wybór właśnie tych dokumentów uzasadniony jest również tym, że po ustanowieniu ww. dyrektywy Polska jest zobowiązana do jej wdrożenia do prawa krajowego.

Różnice między kryteriami oceny zagrożenia oczu

Podstawowe, zauważalne różnice między kryteriami oceny zawartymi w rozporządzeniu i dyrektywie znajdują swe odbicie w podziale i tytułach tabel zawierających wartości graniczne dla oczu. W rozporządzeniu maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) oka na promieniowanie laserowe zestawione są osobno dla źródeł punktowych (patrzenie w wiązkę) i osobno dla źródeł rozciągniętych. W dyrektywie nie ma takiego rozróżnienia, za to pojawia się inne kryterium podziału tabel – czas trwania ekspozycji. W dokumencie tym przyjęto czas trwania ekspozycji poniżej 10 s jako krótki, natomiast czas trwania ekspozycji powyżej 10 s – jako długi.

W dyrektywie dodatkowo podano aperturę zastępczego układu optycznego stosowanego do pomiarów parametrów promieniowania laserowego w celu dokonania oceny zagrożenia tym promieniowaniem, co nie jest uwzględnione w rozporządzeniu.

Różnice ze względu na przyjęte granice zakresów czasu trwania ekspozycji

W obu rozpatrywanych dokumentach przyjęto różne granice zakresów czasu trwania ekspozycji, dla których określone są odpowiednio wartości graniczne ekspozycji oczu na promieniowanie laserowe. W szczególności:

- dla czasu trwania ekspozycji oczu poniżej 10^{-9} s w rozporządzeniu przewidziano tylko jeden przedział czasowy, dla którego określono wartości MDE, a w dyrektywie ten sam przedział czasowy rozdzielono na dwa podzakresy: 10^{-13} ÷ 10^{-11} s oraz 10^{-11} ÷ 10^{-9} s
- dla czasu trwania ekspozycji oczu z przedziału 10^{-7} ÷ $1,8 \cdot 10^{-5}$ s w dyrektywie przewidziano jeden zakres czasowy, dla którego określono wartości graniczne, a w rozporządzeniu ten przedział czasowy został rozdzielony na dwa podzakresy: 10^{-7} ÷ 10^{-6} s oraz 10^{-6} ÷ $1,8 \cdot 10^{-5}$ s
- dla czasu trwania ekspozycji oczu z przedziału $5 \cdot 10^{-5}$ ÷ 10 s w rozporządzeniu przewidziano jeden zakres czasowy, dla którego określono wartości MDE, a w dyrektywie ten przedział czasowy rozdzielono na dwa podzakresy: $5 \cdot 10^{-5}$ ÷ 10^{-3} s oraz 10^{-3} ÷ 10 s
- przedział czasowy ekspozycji oczu 10 ÷ 10^4 s został w obu dokumentach podzielony na dwa różne podzakresy; w dyrektywie podzielono go na podzakresy: 10 ÷ 10^2 s i 10^2 ÷ 10^4 s, a w rozporządzeniu są to podzakresy: 10 ÷ 10^3 s i 10^3 ÷ 10^4 s.

Pozostałe, nie omówione uprzednio, dwa przedziały czasów ekspozycji oczu, czyli 10^{-9} ÷ 10^{-7} s oraz 10^4 ÷ $3 \cdot 10^4$ s są takie same w obu dokumentach.

W odniesieniu do wartości granicznych ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe w obu dokumentach przyjęto takie same granice zakresów czasu trwania ekspozycji.

Różnice ze względu na przyjęte granice zakresów długości fal promieniowania laserowego

Podział granic zakresów długości fali promieniowania laserowego, dla których określone są wartości graniczne ekspozycji, dość znacznie różni się w obu dokumentach. W dyrektywie odrębnie przypisano wartości graniczne ekspozycji oka poszczególnym długościom fali z zakresu 303÷314 nm (podanych z dokładnością do 1 nm), natomiast w rozporządzeniu podano jedną wartość MDE dla całego zakresu długości fal 302,5÷315 nm.

W dyrektywie przyjęto bardziej szczegółowy podział kryteriów ze względu na długość fali w odniesieniu do podczerwonego promieniowania laserowego z zakresu IR-B i IR-C dla krótkich czasów trwania ekspozycji (czyli poniżej 10 s), określono mianowicie cztery zakresy długości fal (1400÷1500 nm, 1500÷1800 nm, 1800÷2600 nm, 2600 nm÷1 mm) i odpowiadające im wartości graniczne ekspozycji oka. Natomiast w rozporządzeniu wyodrębniono trzy inne podzakresy (1400÷1530 nm, 1530÷1550 nm, 1550÷ 10^6 nm). Również w przypadku wartości granicznych ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe można zauważyć bardziej szczegółowy podział kryteriów w dyrektywie (podział na siedem podzakresów: 180÷400 nm, 400÷700 nm, 700÷1400 nm, 1400÷1500 nm, 1500÷1800 nm, 1800÷2600 nm, 2600 nm÷1 mm) niż w rozporządzeniu, gdzie podzakresów jest pięć.

Różnice ze względu na przyjęte wartości graniczne ekspozycji na promieniowanie laserowe

W celu porównania wartości granicznych ekspozycji na promieniowanie laserowe, obliczonych na podstawie kryteriów zawartych w rozporządzeniu i w dyrektywie, wybrano kilka charakterystycznych przypadków, dla których wyliczono wartość według kryteriów z obu dokumentów. Do porównania wybrano długości fal promieniowania laserowego, reprezentatywne dla poszczególnych rodzajów zagrożeń dla oka i skóry, zgodnie z tabelą 12. W sytuacji, gdy wartość graniczna wyznaczona według jednego z dokumentów była mniejsza od

wartości granicznej wyznaczonej według drugiego z rozpatrywanych dokumentów, przyjmowano, że pierwszy dokument ma bardziej restrykcyjne kryteria – czyli wartości graniczne stanowią o ostrzejszych kryteriach oceny zagrożenia. Do wyliczeń przyjęto różne rodzaje pracy lasera (ciągła i impulsowa), różne czasy ekspozycji i długości fali promieniowania laserowego. W obliczeniach pominięto te przedziały zakresów długości fal i czasów ekspozycji, dla których z danych tabelarycznych znajdujących się w obydwu dokumentach jasno wynika, iż wartość MDE i wartości graniczne ekspozycji są takie same. Przypadki te przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12.

Przedziały zakresów długości fal promieniowania laserowego i czasów ekspozycji, dla których MDE i wartości graniczne ekspozycji są takie same

Rodzaj ekspozowanej tkanki	Długość fali nm	Czas trwania s	MDE = wartości graniczne ekspozycji
Oko	180 ÷ 314	$<10^{-9}$	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ Wm}^{-2}$
	180 ÷ 302	$10^{-9} \div 3 \cdot 10^4$	$H = 30 \text{ Jm}^{-2}$
	1530 ÷ 1550	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$H = 10^4 \text{ Jm}^{-2}$
	2600 ÷ 10^6	$<10^{-9}$	$E = 10^{11} \text{ Wm}^{-2}$
	2600 ÷ 10^6	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$H = 100 \text{ Jm}^{-2}$
Skóra	180 ÷ 400	$< 10^{-9}$	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ Wm}^{-2}$
	400 ÷ 700	$< 10^{-9}$	$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Wm}^{-2}$
	2600 ÷ 10^6	$< 10^{-9}$	$E = 10^{11} \text{ Wm}^{-2}$
	1400 ÷ 10^6	> 10	$E = 1000 \text{ Wm}^{-2}$

Wyniki obliczeń i porównania wartości granicznych (zawartych w dyrektywie) i maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE zawarte w rozporządzeniu) dla wybranych przypadków zastosowań przedstawiono w tabeli 13.

W obliczeniach wykorzystano niektóre z parametrów rzeczywistych układów laserowych, których długości generowanej fali promieniowania laserowego mieszczą się w przedziałach zawartych w obydwu dokumentach. Jako że nie wszystkie lasery mogą pracować w reżimie pracy ciągłej i impulsowej, czas ekspozycji starano się tak dobrać, aby w choć jednym przypadku (pracy ciągłej lub impulsowej) odpowiadał on wartości rzeczywistej.

W odniesieniu do laserów impulsowych przyjęto, iż wygenerowały one jeden impuls. Z porównania kryteriów zawartych w obu dokumentach wynika, iż współczynniki korekcyjne dla serii impulsów są w obu dokumentach takie same. W związku z tym, jeżeli w jednym z dokumentów kryteria dla pojedynczego impulsu są ostrzejsze w porównaniu z zawartymi w drugim dokumencie, to dla serii impulsów też będą one bardziej restrykcyjne.

W obydwu dokumentach uwzględniane są tak zwane źródła rozciągle, które są definiowane jako źródła o kącie rozbieżności większym od α_{\min} . Postępując zgodnie z rozporządzeniem, wartość MDE dobiera się na podstawie dwóch różnych tabel (tabela 1 i 2), zależnie od tego, czy badane źródło ma większą czy mniejszą rozbieżność wiązki promieniowania od α_{\min} . Jeżeli:

- $\alpha < \alpha_{\min}$, wartość MDE wybiera się z tabeli dla źródeł punktowych (tabela 1)
- $\alpha > \alpha_{\min}$, wartość MDE wybiera się z tabeli dla źródeł rozciąglonych (tabela 2).

Tabela 13.

Porównanie wyliczonych wartości granicznych ekspozycji i MDE dla różnych długości fal promieniowania laserowego, czasu ekspozycji i rodzaju ekspozowanej tkanki

Rodzaj ekspozowanej tkanki	Lp.	Czas ekspozycji s	Długość fali promieniowania laserowego μm	Maksymalna dopuszczalna ekspozycja (MDE) / wartość graniczna ekspozycji wg		Jednostka	Dokument o ostrzejszym kryterium
				rozporządzenia	dyrektywy		
Oko	1.	5,00E+03	310	1,00E+03	1,00E+03	J/m ²	równoważne
	2.	1,00E-04	310	5,60E+02	5,60E+02	J/m ²	równoważne
	3.	1,00E+04	632	1,70E-01	1,35E+01	W/m ²	rozporządzenie
	4.	1,00E-05	632	5,00E-03	6,67E-03	J/m ²	rozporządzenie
	5.	5,00E+03	1062	1,60E+01	6,73E+01	W/m ²	rozporządzenie
	6.	1,00E-07	1062	5,00E-02	6,67E-02	J/m ²	rozporządzenie
	7.	5,00E+03	1550	1,00E+03	1,00E+03	W/m ²	równoważne
	8.	1,00E-05	1550	3,15E+02	1,00E+04	J/m ²	rozporządzenie
	9.	5,00E+03	2940	1,00E+03	1,00E+03	W/m ²	równoważne
	10.	1,00E-04	2940	5,60E+02	5,60E+02	J/m ²	równoważne
Skóra	1.	5,00E+03	310	1,00E+03	1,00E+03	J/m ²	równoważne
	2.	1,00E-04	310	5,60E+02	5,60E+02	J/m ²	równoważne
	3.	1,00E+04	632	2,00E+03	1,46E+03	W/m ²	dyrektywa
	4.	1,00E-05	632	6,19E+02	5,59E+02	J/m ²	dyrektywa
	5.	5,00E+03	1062	2,00E+03	1,00E+04	W/m ²	rozporządzenie
	6.	1,00E-07	1062	1,96E+02	9,78E+02	J/m ²	rozporządzenie
	7.	5,00E+03	1550	1,00E+03	1,00E+03	W/m ²	równoważne
	8.	1,00E-05	1550	3,15E+02	1,00E+04	J/m ²	rozporządzenie
	9.	5,00E+03	2940	1,00E+03	1,00E+03	W/m ²	równoważne
	10.	1,00E-04	2940	5,60E+02	5,60E+02	J/m ²	równoważne

W dyrektywie nie ma takiego jasnego podziału na źródła punktowe i rozciągłe. Wartość kąta rozbieżności źródła promieniowania jest uwzględniana poprzez zastosowanie współczynników korekcyjnych wykorzystywanych do obliczenia wartości granicznej ekspozycji oka na promieniowanie laserowe. W celu zapewnienia możliwości porównywania między sobą wyników obliczeń założono, że kąt rozbieżności wiązki wynosi 2 mrad.

Wykonane obliczenia wartości granicznych ekspozycji wykazały, iż zmiana czasu trwania ekspozycji w przyjętych granicach przy zadanej długości fali promieniowania laserowego nie wpływa na zmianę ostrości kryterium. A zatem, jeśli w obydwu dokumentach określono jednakowo ostre kryteria, to niezależnie od długości czasu narażenia będą one jednakowo ostre. Podobnie, jeśli jeden z dokumentów zawiera ostrzejsze kryterium dla danej długości fali promieniowania laserowego, to mimo zmiany czasu ekspozycji owo kryterium nadal będzie bardziej ostre.

Podsumowanie i wnioski z analizy kryteriów oceny zagrożenia promieniowaniem laserowym

Porównując wartości graniczne ekspozycji, zawarte w rozporządzeniu i w dyrektywie, nie można jednoznacznie rozstrzygnąć, który z dokumentów zawiera bardziej rygorystyczne kryteria oceny zagrożenia. Można natomiast dokonać porównania ostrości przyjętych kryteriów, z uwzględnieniem rodzaju zagrożenia oka i skóry oraz szkodliwych skutków oddziaływania na oko i skórę poszczególnych zakresów promieniowania optycznego. Takie porównanie przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14.

Szkodliwe skutki nadmiernej ekspozycji oczu i skóry na promieniowanie laserowe

Zakres promieniowania	Oko	Skóra	Dokument o bardziej rygorystycznych kryteriach
UV 180 ÷ 400 nm	uszkodzenie fotochemiczne i termiczne rogówki i soczewki	rumień	równoważne
VIS 400 ÷ 700 nm	fotochemiczne i termiczne uszkodzenia siatkówki	uszkodzenia termiczne	w przeważających przypadkach – dyrektywa ^{a)}
IR-A 700 ÷ 1400 nm	uszkodzenia termiczne rogówki, siatkówki i soczewki	uszkodzenia termiczne	rozporządzenie
IR-B 1400 ÷ 2600 nm			w przeważających przypadkach – rozporządzenie ^{a)}
IR-C 2600 nm ÷ 1 mm			równoważne

^{a)} szczegółowe wartości graniczne ekspozycji i MDE zawarte są w tabeli 13.

Wartości graniczne ekspozycji (wg dyrektywy) i wartości MDE (wg rozporządzenia) oka i skóry w odniesieniu do promieniowania laserowego często różnią się od siebie. Z analizy tabeli 13 wynika jednak, że jeśli w rozpatrywanym przedziale długości fal kryteria zawarte w dyrektywie są bardziej rygorystyczne niż w rozporządzeniu, to różnice pomiędzy MDE i wartościami granicznymi są stosunkowo nieduże (wartości te są zazwyczaj tego samego rzędu). Natomiast w przypadku ekspozycji oczu na promieniowanie laserowe można zauważyć, że jeśli w rozpatrywanym przedziale długości fal rozporządzenie jest bardziej rygorystyczne, to wówczas różnica pomiędzy MDE i wartością graniczną jest bardzo duża (zazwyczaj jest to różnica dwóch rzędów wielkości). W obliczonych przypadkach (tabela 13), w odniesieniu do kryteriów oceny zagrożenia oczu nie było sytuacji, by kryteria dyrektywy były bardziej rygorystyczne niż rozporządzenia.

W odniesieniu do uszkodzeń skóry nie można jednoznacznie orzec, które kryteria są ostrzejsze. Różnice pomiędzy MDE a obliczonymi wartościami granicznymi ekspozycji są raczej niewielkie (zazwyczaj są one tego samego rzędu wielkości).

W wyniku analizy zmian wartości MDE i wartości granicznych ekspozycji w zależności od rozpatrywanego przedziału długości fal promieniowania laserowego, dla którego zostały one wyliczone, można stwierdzić, że:

- w przedziałach długości fal odpowiadających IR-B i IR-C różnią się one nieznacznie, a wartości graniczne są stosunkowo duże. Może to wynikać z faktu, że promieniowanie optyczne z tego zakresu jest silnie pochłaniane przez tkankę zewnętrzną (oko: przez rogówkę i soczewkę; skóra: przez naskórek) i nie stanowi bezpośredniego niebezpieczeństwa dla siatkówki i płamki żółtej. Dzięki temu może być ono wykorzystane w zabiegach operacyjnych (np. rogówki i soczewki oka) oraz zabiegach rehabilitacyjnych i kosmetycznych skóry

- w przedziałach długości fal odpowiadających IR-B i IR-A różnią się one znacząco (różnice około czterech rzędów wielkości). Promieniowanie laserowe z zakresu IR-A docho-
dzi już do siatkówki i plamki żółtej i może spowodować ich poważne uszkodzenie, a w kon-
sekwencji doprowadzić do utraty wzroku. Odzwierciedleniem tego potencjalnego zagrożenia
oczu jest ustanowienie w obu dokumentach dużo bardziej rygorystycznych kryteriów oceny
zagrożenia tym promieniowaniem niż w odniesieniu do IR-B i IR-C

- w przedziałach długości fal odpowiadających promieniowaniu VIS występują
mniejsze wartości graniczne niż dla promieniowania IR-A. Wynika to z faktu, że promienio-
wanie z zakresu VIS może być bardzo niebezpieczne dla oka ludzkiego (zwłaszcza z zakresu
długości fal 400÷500 nm) i może doprowadzić do fotochemicznych lub termicznych uszko-
dzeń siatkówki. Różnica w ostrości kryteriów pomiędzy IR-A a VIS wynosi jeden do dwóch
rzędów wielkości i jest mniejsza w porównaniu z różnicą ostrości kryteriów pomiędzy IR-B
a IR-A, która wynosi ok. czterech rzędów

- wartości graniczne ekspozycji i MDE skóry na promieniowanie laserowe są
znacznie wyższe w porównaniu z wartościami granicznymi dla oka, co oznacza mniej ostre
kryteria oceny zagrożenia. Różnice między wartościami granicznymi dla skóry
w rozpatrywanych przedziałach długości fali promieniowania laserowego najczęściej są nie-
wielkie (wartości są tego samego rzędu bądź różnią się o jeden rząd wielkości).

Jak już wykazano, obydwa dokumenty różnią się co do podziału wartości granicznych
w poszczególnych przedziałach długości fal promieniowania laserowego i przy różnych cza-
sach ekspozycji. Należy zauważyć, iż dyrektywa w pełni obejmuje swym zakresem ocenę
zagrożeń stwarzanych przez wszystkie rodzaje laserów, łącznie z najnowszymi źródłami pro-
mieniowania laserowego, tj. lasery oparte na włóknach fotonicznych, lasery ultrakrótkich im-
pulsów (femtosekundowe) czy nowe aplikacje laserów półprzewodnikowych. Natomiast kry-
teria oceny zagrożenia promieniowaniem laserowym zawarte w rozporządzeniu nie obejmują
najnowocześniejszych źródeł promieniowania laserowego, gdyż rozporządzenie zostało usta-
nowione i wydane dużo wcześniej niż te lasery powstały.

Biorąc pod uwagę przedstawione wnioski oraz fakt, że dyrektywa dotycząca promie-
niowania optycznego została opublikowana w kwietniu 2006 roku oraz że będzie musiała być
implementowana do prawa polskiego, należy stwierdzić, że przyjęcie nowych kryteriów
i wartości granicznych ekspozycji na promieniowanie laserowe jest uzasadnione merytorycznie.

PIŚMIENNICTWO

Dyrektywa 2006/25/UE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymagań
w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowo-
dowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym) (dziewiętnasta dyrektywa
szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG). [http://register.consilium.eu.int/
pdf/en/05/st03/st03668-re05.en05.pdf](http://register.consilium.eu.int/pdf/en/05/st03/st03668-re05.en05.pdf)

Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyż-
szych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU
nr 217, poz. 1833.

ICNIRP (2000) Revision of guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between
400nm and 1.4 μm. Vol. 79, No. 4.

PN EN 60825-1: 2005. Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Cz. 1: Klasyfikacja sprzętu, wymaga-
nia i przewodnik użytkownika.

AGNIESZKA WOLSKA, PIOTR KONIECZNY

Comparison of hazard evaluation criteria and exposure limit values of laser's radiation exposition compulsory in Poland and of EU directive 2006/25/EU

A b s t r a c t

The article presents comparison of laser's radiation hazard evaluation criteria contained in regulation of Ministry of Labour and Social Policy and of EU directive. Authors of article calculated exposure limit values of laser's radiation exposition for random selected wave length and duration of laser pulse from all kind of eyes and skin damages. Based on this calculations they try to say which document contain rigorous criteria.