

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

Promieniowanie laserowe

Dokumentacja dopuszczalnych wartości natężenia czynnika fizycznego

Data przyjęcia przez Grupę Ekspertów ds. Promieniowania Optycznego: 5.10.2009

Data przyjęcia przez Międzyresortową Komisję ds. NDS i NDN: 6.11.2009

Słowa kluczowe: promieniowanie laserowe, zagrożenia dla zdrowia związane z promieniowaniem laserowym, maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE).

Keywords: laser radiation, health hazard related to laser radiation, maximum permissible exposures (MPE).

Wartości graniczne ekspozycji zawarte w dyrektywie 2006/25/WE wynikają z aktualnych wyników badań nad oddziaływaniem promieniowania laserowego na tkanki biologiczne. W związku z obowiązkiem transpozycji zapisów dyrektywy do prawa polskiego, konieczne było przeprowadzenie porównania obowiązujących w Polsce wartości MDE na promieniowanie optyczne z wartościami granicznymi ekspozycji zawartymi w dyrektywie. W związku z występującymi różnicami tych wartości w obu dokumentach, konieczne było opracowanie odpowiedniej dokumentacji dopuszczalnych wartości natężenia czynnika fizycznego – promieniowania laserowego i przedłożenie jej Międzyresortowej Komisji ds. NDS i NDN. Przygotowana dokumentacja zawiera projekt wartości MDE na promieniowanie laserowe, który jest zgodny z granicznymi wartościami ekspozycji na to promieniowanie przyjętymi w załączniku 2. do dyrektywy 2006/25/WE, a także analizę potencjalnych zagrożeń związanych z oddziaływaniem promieniowania laserowego na tkanki biologiczne, statystykę dotyczącą wypadków spowodowanych promieniowaniem laserowym, porównanie kryteriów i wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji zawartych w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS) i najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) czynników szkodliwych w środowisku pracy, propozycję zmian zapisów pkt. 4. „Promieniowanie laserowe” części D załącznika 2. rozporządzenia (nowe wartości MDE), uzasadnienie wprowadzenia zmian w tym rozporządzeniu oraz zakres badań wstępnych i okresowych pracowników narażonych na promieniowanie laserowe.

WPROWADZENIE

W kwietniu 2006 r. opublikowano dyrektywę 2006/25/WE w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane promieniowaniem optycznym. W załączniku 2. do dyrektywy zamieszczono kryteria i wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) na promieniowanie laserowe. Państwa członkowskie mają obowiązek wdrożenia zapisu tej dyrektywy do prawa krajowego do dnia 27 kwietnia 2010 r., co wiąże się z opracowaniem odpowiednich aktów prawnych oraz z przeprowadzeniem analizy porównawczej obowiązujących w Polsce wartości z wartościami znajdującymi się w załączniku do tej dyrektywy.

Urządzenia laserowe są obecnie powszechnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu, a także w badaniach naukowych, medycynie, kosmetologii, telekomunikacji, ochronie środowiska oraz w wojsku. Podczas ich użytkowania przy jednoczesnym stosowaniu przez personel obsługujący odpowiednich środków ochrony indywidualnej prawdopodobieństwo wystąpienia skutków szkodliwych niezamierzonej ekspozycji na promieniowanie laserowe o parametrach stanowiących zagrożenia dla zdrowia jest zazwyczaj małe. Spośród siedmiu wyodrębnionych w normie (PN EN 60825-1: 2005) klas laserów największe zagrożenie stanowią lasery klasy 3b i 4, gdyż 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. Zagrożenie dla zdrowia może również wystąpić podczas przeprowadzania czynności serwisowych tych urządzeń laserowych, gdy przy zdjętych osłonach ochronnych istnieje bezpośredni dostęp do wiązki lasera. Szczególne środki ostrożności powinny być również zachowane w laboratoriach badawczych, gdzie istnieje bezpośredni dostęp do wiązek laserowych i gdzie może wystąpić przypadkowa ekspozycja na wiązkę laserową.

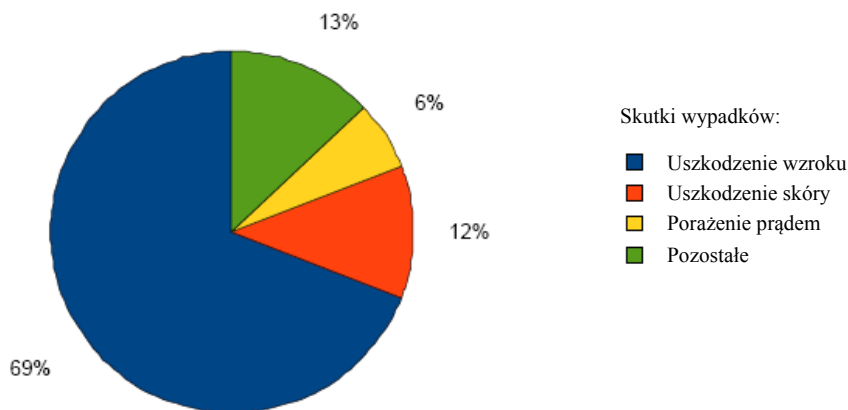
Pierwszy laser został skonstruowany przez *Theodore'a Maimana* w 1960 r. (*Kaczmarek* 1986). Laser ten emitował promieniowanie impulsowe o długości fali 694,3 nm. Początkowo doświadczenia z laserami dotyczyły tylko kilku ich rodzajów. W 1966 r., gdy lasery jonowe o mocy rzędu kilku watów, jak np. laser argonowy, stały się dostępne komercyjnie coraz większą uwagę zaczęto zwracać na bezpieczeństwo pracy z laserami. Zalecane maksymalne wartości ekspozycji rogówki na promieniowanie były wtedy podawane głównie dla lasera rubinowego i zmieniały się z biegiem czasu od $6,9 \cdot 10^{-3}$ do 10 W/m^2 (*Trager* 2007). Wówczas gdy coraz więcej było wiadomo na temat oddziaływania promieniowania laserowego na tkankę, obostrzenia stawały się znacznie mniej rygorystyczne. Wzrastająca liczba użytkowników laserów i stosowanie ich w nowych aplikacjach w połączeniu z brakiem odpowiednich środków ochrony było powodem rosnącej liczby wypadków związanych z laserami. Uszkodzenia wzroku były wtedy znacznie częstsze, podczas gdy takie uszkodzenia skóry, jak oparzenia czy nawet zwęglenia zdarzały się rzadziej (*Trager* 2007).

Obecnie znaczna liczba instytucji zajmuje się aspektami bezpieczeństwa związanymi z promieniowaniem laserowym i ustanawia dokumenty zawierające kryteria oceny zagrożenia tym promieniowaniem. Są to m.in. następujące instytucje: ICNIRP, CIE, ACGIH, IEC, a także takie organizacje, jak CEN i CENELEC, które ustanowiły szereg norm międzynarodowych. Publikacje tych instytucji oraz normy międzynarodowe były podstawą kryteriów zawartych w dyrektywie 2006/25/WE.

Aby chronić człowieka przed niekorzystnym wpływem promieniowania laserowego, wprowadzono wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji (MDE), które ustalono na podstawie dostępnej wiedzy naukowej i wyników badań eksperymentalnych.

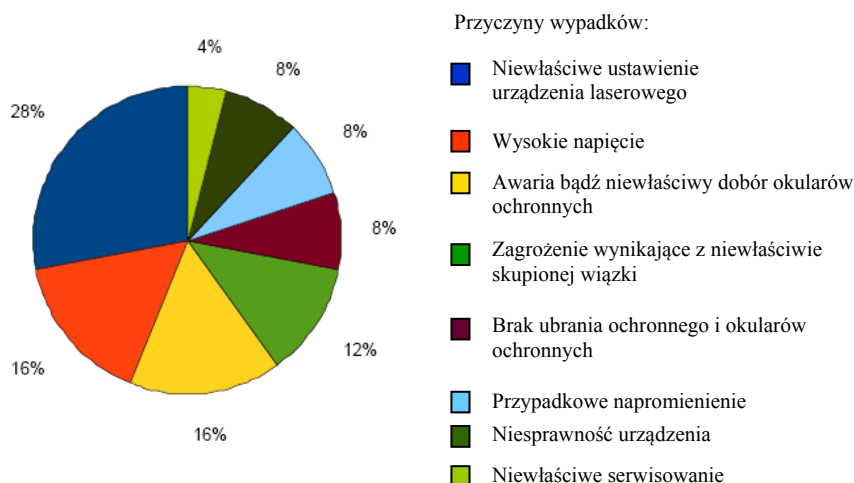
Odkąd coraz większa liczba urządzeń jest wyposażona w lasery, których zakresy widmowe najczęściej pokrywają pasmo optyczne, a moc ich promieniowania wynosi od kilku mikrowatów do rzędu peta watów (szczytowa moc impulsów gigantycznych), muszą zostać rozważone wszelkie możliwe sytuacje związane z wystąpieniem zagrożenia tym promieniowaniem dla człowieka.

Na podstawie danych statystycznych można stwierdzić, że przeważająca część wypadków przy pracy z urządzeniami laserowymi dotyczy uszkodzeń wzroku (69%), a następnie skóry (12%), co zostało zobrazowane na diagramie (rys. 1.).



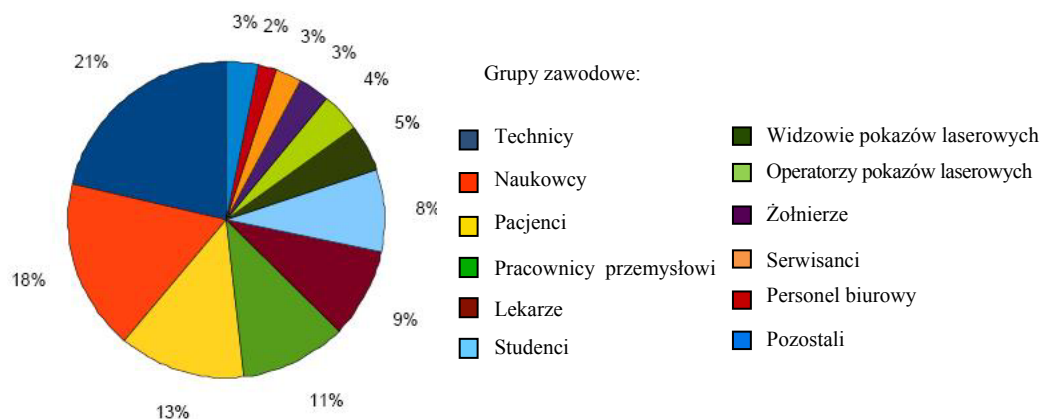
Rys. 1. Skutki wypadków przy pracy z urządzeniami laserowymi (Rockwell Laser...)

Głównymi przyczynami wypadków przy pracy z urządzeniami laserowymi były niewłaściwe ustawione urządzenia laserowego (28%) oraz wysokie napięcie zasilające (16%). Znaczna część wypadków była spowodowana również przez uszkodzenie lub niewłaściwy dobór okularów ochronnych (16%), brak ubrania ochronnego i okularów ochronnych (8%) oraz przypadkowe napromienienie (8%). Procentowy podział przyczyn wypadków przedstawiono na rysunku 2.



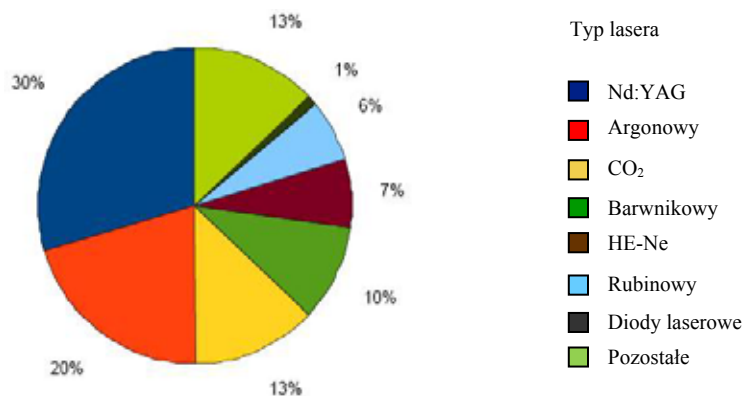
Rys 2. Przyczyny wypadków podczas pracy z urządzeniami laserowymi (Rockwell Laser...)

Najwięcej wypadków przy urządzeniach laserowych zanotowano u pracowników technicznych oraz naukowców, co przedstawiono na rysunku 3. Wynikało to przede wszystkim z braku osłon przed promieniowaniem laserowym oraz z niestosowania okularów ochronnych (Rockwell Laser...)



Rys. 3. Wypadki podczas pracy z urządzeniami laserowymi w poszczególnych grupach zawodowych (Rockwell Laser...)

Jeśli chodzi o rodzaje laserów, przy których obsłudze najczęściej dochodzi do wypadków, to na pierwszym miejscu znajdują się lasery Nd:YAG (29,7%), a następnie lasery argonowe (20,5%) oraz lasery CO₂ (12,8%), (Rockwell Laser...). Na rysunku 4. Przedstawiono graficznie częstotliwość wypadków przy obsłudze danego typu lasera.



Rys. 4. Częstotliwość wypadków przy obsłudze danego typu lasera (Rockwell Laser...)

Zgodnie z danymi GUS (2007) liczba pracowników zatrudnionych w warunkach zagrożenia promieniowaniem laserowym wyniosła 1018.

W zależności od sektora działalności (np.: budownictwo, przemysł zbrojeniowy, medycyna) można wyróżnić różne rodzaje laserów znajdujących w nich zastosowanie. Poniżej wymieniono rodzaje laserów stosowanych w różnych gałęziach gospodarki:

- wojsko:
 - laser helowo-neonowy (632 nm) – czołgi, ćwiczenia bojowe, celowniki
 - laser tytanowy Ti:Al₂O₃ (650 do 1100 nm) – dalmierze
 - laser półprzewodnikowy na bazie GaAs (905 nm) – komunikacja
 - laser Nd:YAG (1064nm) – dalmierze, lidary
 - laser CO₂ (10600 nm) – dalmierze
- przemysł:
 - laser helowo-neonowy (632 nm) – budownictwo (poziomice), wyznaczanie płaszczyzn cięcia przy obróbce materiałów

- lasery półprzewodnikowe – telekomunikacja
- laser Nd:YAG – znakowanie, cięcie, grawerowanie i spawanie
- laser CO₂ – cięcie i spawanie cienkich blach, znakowanie i drażnienie otworów
- medycyna:
 - lasery ekscimerowe – ArF (193 nm), KrCl (222 nm), XeCl (308 nm), XeF (351 nm) LASIK (Laser Assisted in-situ Keratomileusis)
 - lasery półprzewodnikowe – biostymulacja
 - laser rubinowy (694,3 nm) – depilacja
 - laser Nd:YAG (1064 nm) – chirurgia, stomatologia
 - laser CTH:YAG (2130 nm) – chirurgia
 - laser Er:YAG (2936 nm) – mikrochirurgia, stomatologia
 - laser CO₂ (10 600 nm) – chirurgia, stomatologia
- nauka:
 - lasery ekscimerowe – ArF (193 nm), KrCl (222 nm), XeCl (308 nm), XeF (351 nm) – nanolitografia, spektroskopia masowa i metoda UV-MALDI
 - lasery półprzewodnikowe – pompowanie innych ośrodków laserowych, wskaźniki
 - laser rubinowy (694,3 nm) – holografia
 - laser Nd:YAG (1064 nm) – badania materiałowe, biologia
 - laser CTH:YAG (2130 nm) – chirurgia
 - laser Er:YAG (2936 nm) – metoda IR-MALDI
 - laser CO₂ (10 600 nm) – badania materiałowe, biologia.

BIOLOGICZNE SKUTKI NARAŻENIA TKANEK NA PROMIENIOWANIE LASEROWE

Właściwości optyczne ośrodka, w którym propaguje się promieniowanie, są podstawowym czynnikiem określającym potencjalne skutki oddziaływania promieniowania laserowego na tkanki.

Promieniowanie laserowe charakteryzuje się dodatkowo unikatowymi właściwościami, niespotykanymi w innego rodzaju promieniowaniu. Podstawowe różnice między klasycznymi i laserowymi źródłami promieniowania są następujące (*Zajac 1998*):

- w przypadku promieniowania laserowego mamy do czynienia ze stosunkowo wąskimi (często nazywanymi monochromatycznymi) liniami emisyjnymi. Luminancja źródeł laserowych przewyższa o kilka rzędów luminancję naturalnych źródeł promieniowania (np. wartość luminancji promieniowania lasera He-Ne o mocy 1 m · W jest większa o czynnik 50, natomiast 25 W lasera Nd:YAG CW większa o czynnik 10⁵ od luminancji słońca). Jeszcze bardziej szokujące są porównania dla luminancji spektralnej dające wartości różniące się o czynnik 10⁹ dla lasera He-Ne (*Rodney, Hollifield 2003*)
- promieniowanie ze źródeł laserowych może być promieniowaniem spójnym, niemniej cecha ta w przypadku oddziaływań promieniowania na tkanki ma znaczenie drugorzędne
- wiązka laserowa jest (lub może być) wiązką spolaryzowaną
- wiązka laserowa jest wiązką skolimowaną, co pozwala na uzyskanie przy zastosowaniu optycznych układów formowania, znacznie mniejszych niż w przypadku termicznych źródeł promieniowania, rozmiarów ognisk, a tym samym możliwe jest uzyskiwanie znacznie większych gęstości strumienia promieniowania i gęstości energii promieniowania w tkance lub na jej powierzchni

- możliwe jest skuteczne formowanie przestrzennych i czasowych charakterystyk wiązki światła. Procedury i metody stosowane do kształtowania obydwu tych grup parametrów charakteryzujących własności wiązki nie są tożsame, a nawet w przypadku niektórych parametrów są przeciwstawne (np. rozkład jednomodowy \longleftrightarrow duża energia impulsu)
- duże moce chwilowe wiązki, które można uzyskiwać metodami stosowanymi w technice laserowej, a także skutecznie doprowadzić do obszaru oddziaływania niespotykanego w innych źródłach promieniowania.

Wymienione cechy wiązek laserowych świadczą z jednej strony o ich wyjątkowej atrakcyjności w różnych aplikacjach, a z drugiej mogą powodować zagrożenia dla zdrowia człowieka w przypadku ekspozycji na promieniowanie laserowe.

Występowanie różnych procesów fizycznych podczas oddziaływania promieniowania laserowego z tkankami jest związane zasadniczo z trzema następującymi podstawowymi różnicami tkanek:

- makroskopowymi (w objętości i budowie poszczególnych organów), co z punktu widzenia analizy skutków ekspozycji tkanki na promieniowanie laserowe jest czynnikiem drugorzędym, istotna staje się jedynie znajomość rozmiaru obszaru oddziaływania
- mikroskopowymi (w zakresie rozmiarów i geometrii pojedynczych komórek oraz ich wzajemnego usytuowania), co ma wpływ na dystrybucję energii w obszarze oddziaływania
- składu chemicznego tkanek, który ma wpływ na wartość współczynnika absorpcji, a tym samym na wielkość transmisji.

Tkanki, ze względu na ich właściwości optyczne, można podzielić na dwie podstawowe grupy:

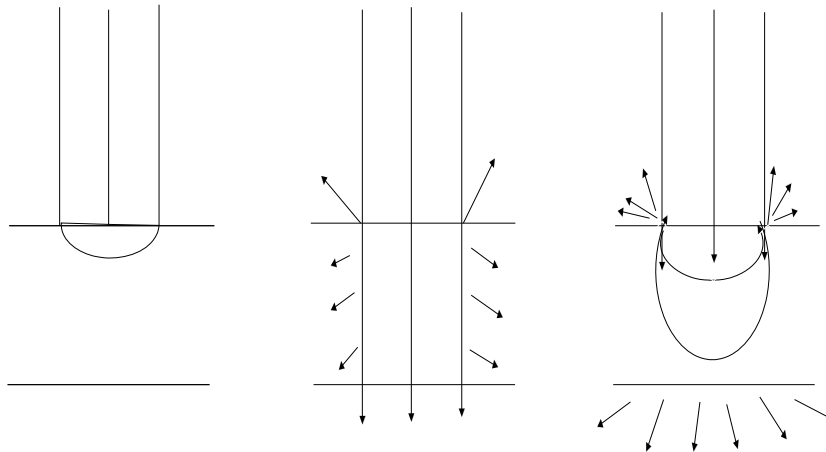
- przezierne w stosunkowo szerokim zakresie spektralnym (zakres widzialny widma elektromagnetycznego), do której należą tkanki oka, a także w zasadzie wszystkie tkanki w zakresie tzw. okien optycznych w podczerwieni (Boas 1996; Cysewska-Sobusiak 1995) obejmujących zakres spektralny 700 ÷ 900 nm
- wykazujące stosunkowo wysoką i równocześnie zmienną absorpcję w funkcji długości fali promieniowania oraz parametrów fizycznych.

Z punktu widzenia relacji zachodzącej między współczynnikiem absorpcji oraz współczynnikiem rozproszenia w tkankach rozróżnia się trzy podstawowe przypadki zachodzące podczas oddziaływania wiązki laserowej z tkankami związane z (rys. 5.):

- dominującą absorpcją
- porównywalną absorpcją i rozproszeniem
- dominującym rozproszeniem.

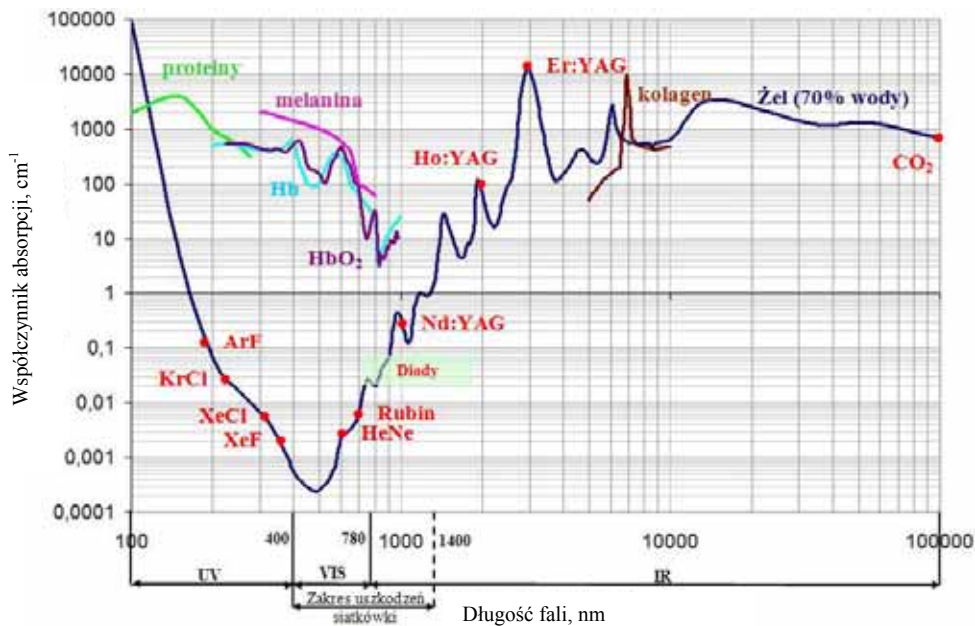
W związku z różnymi mechanizmami transferu energii w tkance występują odmienne skutki i zjawiska fizyczne, podczas transferu energii wiązki laserowej w tkance.

W przypadku oddziaływania na tkankę energiami pozwalającymi na waporyzację tkanki w obszarze oddziaływania, podstawową różnicą powinna być wielkość krateru w tkance powstałego w miejscu ekspozycji wiązką laserową (Kaczmarek i in. 1994). Przy oddziaływaniu w przypadkach dużych wartości współczynnika absorpcji obserwowane są skutki wyrzucania odwodnionych fragmentów tkanki (Kaczmarek i in. 1994).



Rys. 5. Schematyczne przedstawienie obszaru oddziaływania promieniowania laserowego z ośrodkiem w zależności od relacji między współczynnikiem absorpcji i współczynnikiem rozproszenia (relacje słuszne dla cienkiej warstwy absorbera), (Walsh, Deutsh 1991). Kolejno od lewej strony przedstawiono przypadek: dominującej absorpcji, porównywalnej absorpcji i rozproszenia, dominującego rozproszenia

Poza zakresem widzialnym widma promieniowania można przyjąć (Materiały Laser Professionals), że właściwości optyczne tkanek są podobne. Podstawową przyczyną tego stanu jest fakt dominującej roli wody zawartej w tkankach. Sytuacja taka znajduje odzwierciedlenie w ogólnie przyjętym założeniu pozwalającym na modelowanie właściwości tkanek dla promieniowania o długości fali większej niż $1 \mu\text{m}$ właściwościami wody (Laser Professionals). Sprowadza się to do przyjmowania parametrów optycznych wody jako parametrów fizycznych tkanki podczas modelowania procesów oddziaływania na nie promieniowania laserowego. Na rysunku 6. przedstawiono przebieg zmian właściwości absorpcyjnych tkanek oraz żelu imitującego ludzkie ciało. Dodatkowo zaznaczono długości fal, na których generują lasery najpowszechniej spotykane w: nauce, przemyśle, medycynie oraz wojsku.



Rys. 6. Wykres współczynnika absorpcji tkanek oraz wody w przedziale spektralnym $100 \div 10000 \text{ nm}$. Na rysunku naniesiono położenie linii emisji laserów najczęściej wykorzystywanych w: nauce, przemyśle, medycynie oraz w wojsku

W zakresie fal krótkich (UV) promieniowanie laserowe jest absorbowane głównie przez proteiny. W wyniku oddziaływania wysokoenergetycznych fotonów z łańcuchami białkowymi może dochodzić do ich rozrywania (efekty fotochemiczne). W zakresie promieniowania widzialnego oraz bliskiej podczerwieni IR-A do około 1 μm głównym absorberem jest melanina (naturalny barwnik skóry) oraz hemoglobina (w zależności od stopnia natlenienia krwi zmieniają się nieznacznie jej parametry absorpcyjne). Powyżej 1 μm praktycznie całe promieniowanie laserowe jest absorbowane przez znajdującą się w tkankach wodę. Dlatego dla promieniowania z zakresu powyżej 1 μm , parametry optyczne tkanek z dużą dokładnością (rzędu 90%) przybliża się parametrami wody.

Wśród mechanizmów powstawania uszkodzeń przy oddziaływaniu promieniowania laserowego na tkankę możemy wyróżnić oddziaływania: termiczne, fotochemiczne, fotoablacyjne i elektromechaniczne. To, w jakim stopniu dany mechanizm odpowiada za uszkodzenie, zależy w dużej mierze od sposobu i ilości dostarczonej energii.

Oddziaływanie termiczne

Eksponując tkankę biologiczną na promieniowanie z zakresu optycznego (w tym również laserowego), dostarcza się do niej energię, która po zaabsorbowaniu powoduje zwiększenie energii kinetycznej (drgań) cząstek. Skutkiem makroskopowym tego zjawiska jest wzrost temperatury tkanki. Wówczas gdy eksponowany obszar przekroczy temperaturę 45 °C, następuje rozrywanie błon komórkowych oraz spiekanie tkanek. Powyżej temperatury 60 °C występuje częściowa waporyzacja tkanek. Oba te procesy prowadzą do martwicy tkanek. Przy temperaturze 100 °C następuje wrzenie wody zawartej w tkankach, a po przekroczeniu temperatury 150 °C obserwuje się zwęglenie białek tkankowych (Kaczmarek i in. 1994). Termiczne uszkodzenie tkanki nie ogranicza się zazwyczaj do granic obszaru, w jakim została zaabsorbowana dostarczona energia – podczas długotrwałej ekspozycji rozływ ciepła powoduje (niekiedy znaczne) zwiększenie obszaru martwiczonego (Trager 2007; Kaczmarek i in. 1994). W wyniku oddziaływania termicznego może dojść do procesów ablacji oraz mechanicznego uszkodzenia tkanek, przy dostatecznie dużych wartościach gęstości energii/mocy. Procesy te charakteryzują się pewnymi specyficznymi właściwościami, dlatego zostały wyróżnione osobno, ale przy analizie zagrożeń traktuje się je jako skutki termiczne.

Oddziaływanie fotoablacyjne

Oddziaływanie fotoablacyjne występuje w momencie oddziaływania na tkankę krótkich impulsów promieniowania (o czasie trwania poniżej pojedynczych mikrosekund) o gęstości mocy powyżej $10^4 \text{ M} \cdot \text{W}/\text{m}^2$ (w zależności od współczynnika absorpcji tkanki). Zaabsorbowane fotony powodują rozłożenie na małe molekuly części materiału (około 5%) w obszarze, na którym zachodzi fotoablacja. W przypadku oddziaływania promieniowania krótkofalowego, długie łańcuchy białkowe zostają rozbite oraz zostaje wytworzona energia nadmiarowa po zerwaniu wiązań, która powoduje lokalny wzrost ciśnienia. Rozprężanie ciśnienia do swobodnej przestrzeni skutkuje objętościową eksplozją tkanki. W przypadku fotoablacji destrukcja tkanki jest bardzo efektywna, a uszkodzenia termiczne warstw otaczających bardzo małe (Kaczmarek i in. 1994). W przypadku promieniowania IR skutek jest nieco inny – wysoka energia promieniowania oraz wysoki współczynnik ab-

sorpcji tkanek biologicznych skutkują szybkim wzrostem temperatury tkanki w obszarze oddziaływania, co wywołuje objętościową eksplozję tkanki.

Oddziaływanie elektromechaniczne

Zjawisko oddziaływania elektromechanicznego występuje przy gęstości mocy promieniowania laserowego rzędu 100 MW/cm^2 i nie zależy od współczynnika absorpcji tkanki. W miejscu oddziaływania powstaje bardzo silne pole elektryczne, rzędu 10^9 V/cm , a w rezultacie jonizacja ośrodka. Następuje optyczne przebicie i powstanie plazmy o małej objętości, która zaczyna się bardzo szybko rozszerzać, powodując powstanie fali uderzeniowej. Ciśnienie wewnątrz tkanki wzrasta o $20 \div 60 \text{ kbar}$ i następuje mechaniczne uszkodzenie tkanki (*Kaczmarek i in. 1994*).

Oddziaływanie fotochemiczne

Uszkodzenie tkanki może być wynikiem absorpcji molekularnej promieniowania. Procesy fotochemiczne wiążą się z reakcją chemiczną specyficzną dla stanu wzbudzonego. Reakcje te odpowiadają za uszkodzenia przy małych poziomach ekspozycji oraz przy jednoczesnej, wysokiej absorpcji promieniowania przez tkankę. Takie tkanki, jak soczewka czy siatkówka oka pod wpływem wydłużonych ekspozycji na promieniowanie UV lub krótkofalowych o umiarkowanym poziomie mogą ulec nieodwracalnym zmianom (*Trager 2007; Kaczmarek in. 1994*). Oddziaływanie fotochemiczne ma charakter sumacyjny, przez co zmiany chorobowe mogą występować w przypadku serii dawek promieniowaniem optycznym. Oddziaływania fotochemiczne występują dla promieniowania o długości fali poniżej 600 nm .

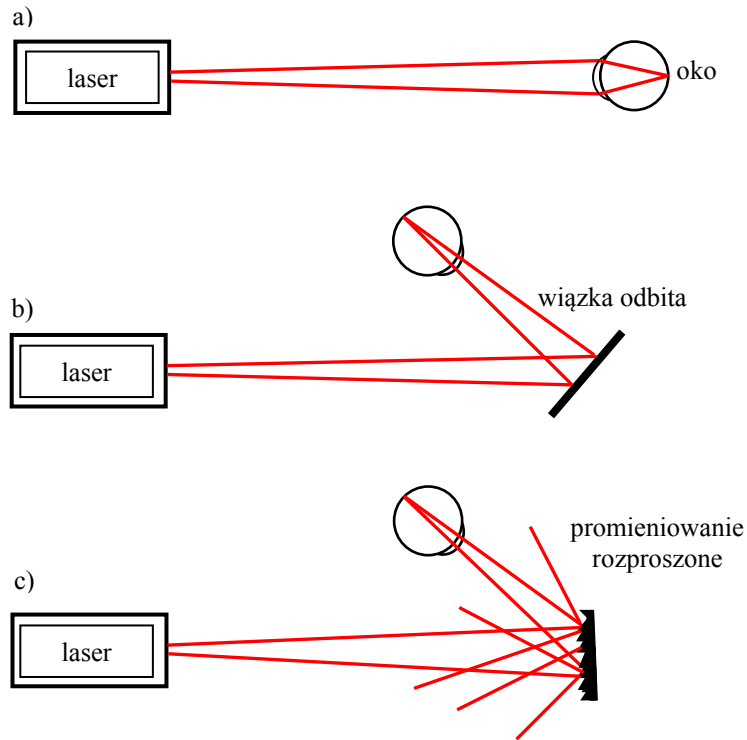
ZAGROŻENIA ZWIĄZANE Z EKSPOZYCJĄ NA PROMIENIOWANIE LASEROWE

Zagrożenia gałki ocznej związane z ekspozycją na promieniowanie laserowe

Na podstawie analizy przypadków wystąpienia uszkodzenia tkanek człowieka promieniowaniem laserowym można stwierdzić, iż w przypadku niezamierzonej ekspozycji na promieniowanie laserowe najczęściej dochodzi do uszkodzenia narządu wzroku.

Zarówno w przypadku skóry, jak również oczu zagrożenie może pochodzić od wiązki laserowej skierowanej bezpośrednio na tkankę, jak również od wiązki odbitej oraz rozproszonej (rys. 7.).

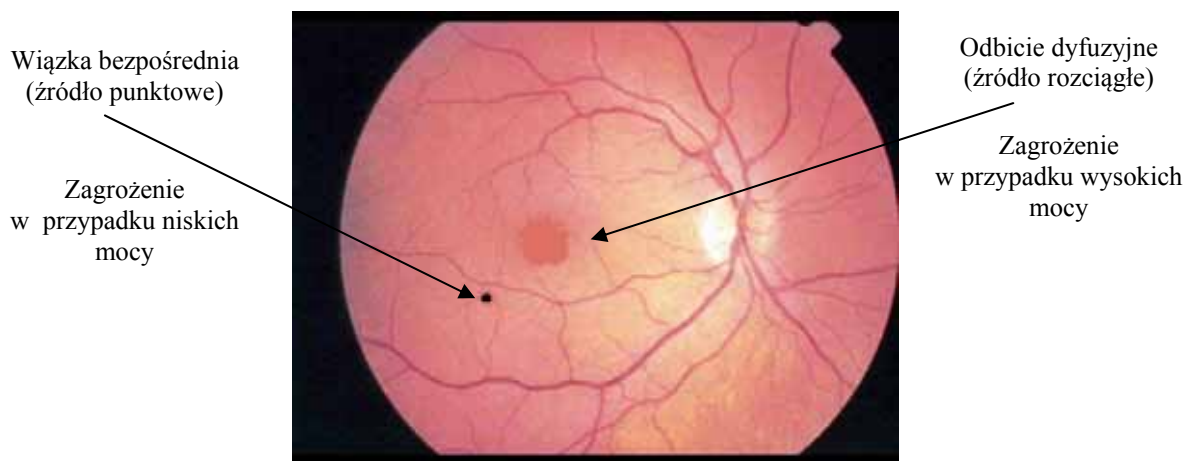
W przypadku ekspozycji oka na wiązkę bezpośrednio już bardzo niskie poziomy mocy promieniowania mogą powodować uszkodzenia narządu wzroku, podobnie ma to miejsce w przypadku odbić zwierciadlanych, np. od wypolerowanych powierzchni metalicznych. W przypadku odbicia dyfuzyjnego znacznie wyższe moce promieniowania padającego są potrzebne, aby mogło dojść do uszkodzenia tkanki.



Rys. 7. Rodzaje ekspozycji oka na promieniowanie laserowe: a) patrzenie bezpośrednio w wiązkę, b) odbicie zwierciadlane, c) odbicie dyfuzyjne

Na rysunku 8. przedstawiono uszkodzenie siatkówki oka w przypadku ekspozycji oka na promieniowanie bezpośrednie (źródło punktowe) oraz rozproszone (źródło rozciągłe).

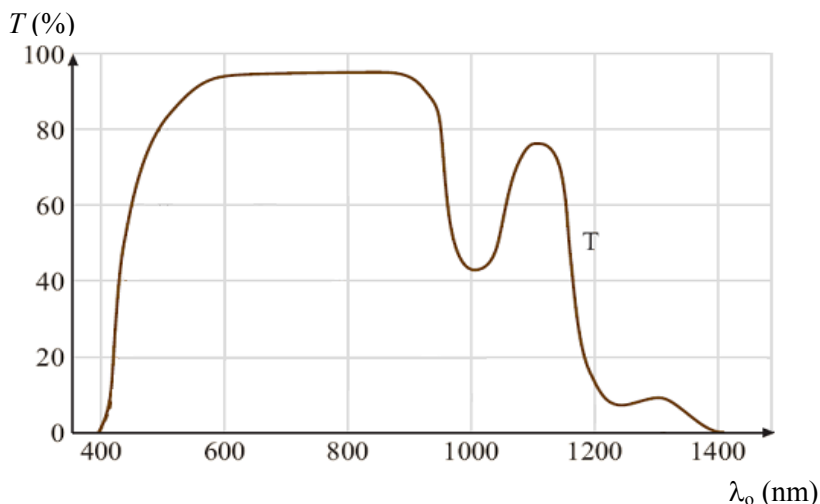
Źródła rozciągłe tworzą na siatkówce znacznie większy obraz niż źródła punktowe, przez co niezbędna jest znacznie większa moc, aby mogło dojść do uszkodzenia tkanki. Jednakże wiązka rozproszona może spowodować uszkodzenie znacznie większego obszaru, a tym samym znacznie pogorszyć zdolność widzenia, gdy próg uszkodzenia zostanie przekroczony.



Rys. 8. Przykład uszkodzenia siatkówki w przypadku ekspozycji na promieniowanie bezpośrednie oraz rozproszone (odbicie dyfuzyjne), (Laser Professional)

Nadmierna ekspozycja oka na promieniowanie optyczne może wywołać skutki szkodliwe, które zestawiono w tabeli 1. Najbardziej niebezpieczny jest zakres długości fal 400 ÷ 1400 nm,

nazywany zakresem zagrożenia siatkówki. Wynika to z faktu, że promieniowanie z tego zakresu jest transmitowane przez układ optyczny oka od płaszczyzny rogówki do siatkówki. Na rysunku 9. (Trager 2007) przedstawiono charakterystykę transmisyjną promieniowania z zakresu zagrożenia siatkówki w funkcji długości fali w elementach budowy oka. Największy współczynnik transmisji przypada na promieniowanie z zakresu 400 ÷ 1200 nm i maleje w przypadku dłuższych fal.



Rys. 9. Transmisja oka od płaszczyzny rogówki do siatkówki w funkcji długości fali (Trager 2007)

Tabela 1.

Zestawienie skutków towarzyszących nadmiernej ekspozycji oka na promieniowanie optyczne

Zakres widmowy wg CIE	Skutki szkodliwe towarzyszące nadmiernej ekspozycji oka na promieniowanie optyczne	Głębokość wnikania promieniowania optycznego do oka
Nadfiolet C (180 ÷ 280 nm)	zapalne uszkodzenie rogówki	
Nadfiolet B (280 ÷ 315 nm)	zaćma	
Nadfiolet A (315 ÷ 400 nm)	zaćma	
Widzialny (400 ÷ 780 nm)	fotokemiczne i termiczne uszkodzenie siatkówki	
Podczerwień A (780 ÷ 1400 nm)	zaćma, oparzenie siatkówki	
Podczerwień B (1,4 ÷ 3 μm)	przymglenie rogówki, zaćma, oparzenie rogówki	
Podczerwień C (3 μm ÷ 1,0 mm)	oparzenie rogówki	

Oko ma zdolność do ogniskowania promieniowania optycznego padającego na jego rogówkę do stosunkowo małej plamki na siatkówce. Przy poprawnym widzeniu ogniskowanie następuje w dołku centralnym. Natężenie napromienienia może być w tym punkcie na siatkówce zwiększone nawet około 500 000 razy w stosunku do natężenia napromienienia na powierzchni rogówki (przy założeniu pełnego otwarcia źrenicy oka). Ta zmiana natężenia napromienienia promieniowania jest równoważna ilorazowi powierzchni źrenicy oka do powierzchni plamki wytworzonej przez układ optyczny oka na jego siatkówce (Trager 2007), co przedstawiono za pomocą równania:

$$\frac{(\text{największa średnica źrenicy})^2}{(\text{najmniejsza średnica plamki na siatkówce})^2} \approx \frac{7 \text{ mm}^2}{10 \mu\text{m}^2} \approx 500\,000.$$

Przy rozważaniu zdolności ludzkiego oka do ogniskowania na siatkówce obserwujemy, że wiązka laserowa o natężeniu napromienienia 10 W/m^2 w płaszczyźnie źrenicy po zogniskowaniu na siatkówce uzyskuje natężenie napromienienia 5 MW/m^2 . Cecha ta musi zostać uwzględniona przy analizie zagrożeń promieniowaniem laserowym z zakresu długości fal $400 \div 1400 \text{ nm}$. Ponieważ promieniowanie z tego zakresu jest transmitowane przez elementy budowy oka, największym zagrożeniem jest uszkodzenie siatkówki. Promieniowanie o długościach fal spoza tego zakresu nie powinno być lekceważone i klasyfikowane jako *eye-safe*, ponieważ również w tym wypadku może nastąpić uszkodzenie oczu.

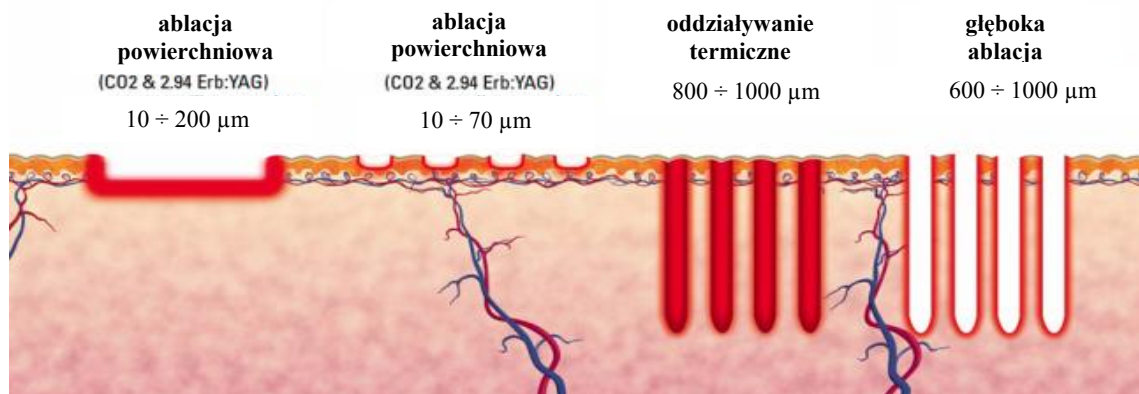
W przypadku promieniowania z zakresu $400 \div 1400 \text{ nm}$ jedynie 5% energii promieniowania optycznego absorbują barwniki zawarte w fotoreceptorach – czopkach i pręcikach. Większość promieniowania zostanie zaabsorbowana przez pigment (melaninę) zawarty w barwniku nabłonkowym siatkówki, którego grubość wynosi około $20 \mu\text{m}$. W rezultacie pochłonięta energia spowoduje podgrzanie tkanki nabłonkowej oraz sąsiadujących fotoreceptorów i może sięgać nawet tkanki naczyniowej. Wywołane w ten sposób oparzenie siatkówki może prowadzić nawet do utraty wzroku. Przy ekspozycji oka na promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni (IR-A) występuje brak mechanizmów obronnych w postaci mrugania. Dzieje się tak, ponieważ promieniowanie to jest niewidoczne dla oka, w związku z czym stanowi szczególne zagrożenie.

Zagrożenia skóry spowodowane promieniowaniem laserowym

W przypadku ekspozycji na promieniowanie laserowe, oprócz uszkodzeń oka, może dojść także do uszkodzenia skóry. Aby doszło do uszkodzenia skóry promieniowaniem z zakresu $400 \div 1400 \text{ nm}$ są wymagane znacznie większe wartości natężenia napromienienia niż w przypadku oka. Promieniowanie to nie jest ogniskowane na powierzchni tkanki, jak ma to miejsce w przypadku ekspozycji oka. W pozostałych zakresach spektralnych (UV, IR-B oraz IR-C) prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia skóry jest takie samo jak w przypadku oka, a także wartości natężenia napromienienia wywołujące zagrożenie są takie same.

Podobnie jak w przypadku ekspozycji oka, zagrożenie dla skóry może stanowić zarówno wiązka bezpośrednia, jak również wiązka odbita oraz rozproszona.

W zależności od długości fali promieniowanie laserowe wnika do tkanki skóry na różną głębokość i jest absorbowane w różnych jej częściach. Po wnikięciu promieniowania do tkanki skóry jest ono w niej absorbowane i rozpraszane, część jest także transmitowana do głębszych partii, a w zależności od współczynnika absorpcji zmienia się wartość głębokości wnikania promieniowania. Na rysunku 10. przedstawiono: różne przykłady skutków oddziaływania promieniowania laserowego na skórę.



Rys. 10. Skutki oddziaływania promieniowania laserowego z tkankami skóry (Walsh, Deutsh 1991)

Występowanie procesów przedstawionych na rysunku 10. jest uzależnione od długości fali promieniowania padającego na tkankę, a tym samym od współczynnika absorpcji. W przypadku dużych wartości współczynnika absorpcji, przykładowo dla lasera erbowego Er:YAG ($> 10\,000\text{ cm}^{-1}$) oraz lasera CO₂ (około 100 cm^{-1}), jeżeli natężenia napromienienia przekroczy próg ablacji, głębokość penetracji tkanki jest bardzo mała, rzędu dziesiątek mikrometrów. W tym przypadku tylko wierzchnia warstwa naskórka zostaje uszkodzona. Jeżeli jednak wartość natężenia napromieniania jest poniżej progu ablacji, zachodzą procesy termiczne, które w krótkim czasie powodują ogrzanie tkanki i wystąpienie poważnych powikłań, a głębokość powstałych uszkodzeń może dochodzić do 1 mm.

Promieniowanie z zakresu widzialnego oraz bliskiej podczerwieni wnika w obszar tkanki skórnej znacznie głębiej. Często może wystąpić sytuacja, w której po ekspozycji na promieniowanie laserowe, na powierzchni skóry jest widoczny jedynie mały ślad (przebarwienie), natomiast wewnątrz tkanka jest uszkodzona. Rany tego typu goją się znacznie dłużej i powodują częste powikłania w trakcie leczenia.

Charakterystyka zagrożeń związanych z ekspozycją na promieniowanie laserowe generowane przez lasery najczęściej stosowane w: przemyśle, wojsku, medycynie i nauce

Omówiono skutki oddziaływania promieniowania generowanego przez poszczególne lasery na tkanki biologiczne, w szczególności tkanki gałki ocznej.

Laser Nd:YAG

Laser na bazie kryształu granatu itrowo aluminiowego domieszkowanego jonami neodymu jest laserem, oprócz lasera gazowego CO₂, jednym z najczęściej wykorzystywanych w różnych dziedzinach życia. Lasery neodymowe generują promieniowanie na długości fali 1064 nm. W przypadku ekspozycji tkanki na promieniowanie lasera neodymowego zachodzą jedynie oddziaływania termiczne. Współczynnik absorpcji tkanek dla długości fali 1064 nm jest równy około 1 cm^{-1} , co przekłada się na drogę absorpcji (głębokość, na której absorbowane jest 90% promieniowania laserowego) równą 0,4 cm. Oznacza to, iż promieniowanie lasera neodymowego wnika stosunkowo głęboko w obszar tkanki, powodując duże uszkodzenia w wewnętrznych partiach skóry. W

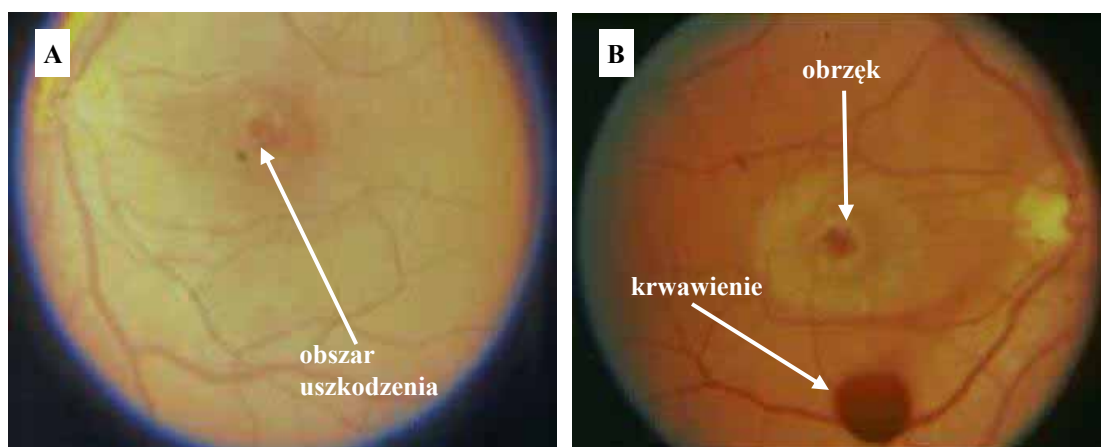
wyniku tego rany powstałe na skutek ekspozycji tym promieniowaniem bardzo trudno się goją i nawet po kilku miesiącach od ekspozycji mogą być odczuwalne jej skutki.

Promieniowanie o długości fali 1064 nm mieści się w zakresie bliskiej podczerwieni (zakres 800 ÷ 1400 nm). Zgodnie z rysunkiem 9. jest transmitowane przez elementy optyczne oka, a dodatkowo jest ono przez nie ogniskowane na siatkówce, co znacznie zwiększa niebezpieczeństwo wystąpienia uszkodzeń narządu wzroku. Uszkodzenia narządu wzroku wywołane ekspozycją na promieniowanie lasera Nd:YAG są na ogół termicznymi uszkodzeniami siatkówki i zalicza się do nich:

- obrzęk siatkówki
- krwotok
- bruzdy na całej głębokości siatkówki
- odklejanie siatkówki
- martwicę.

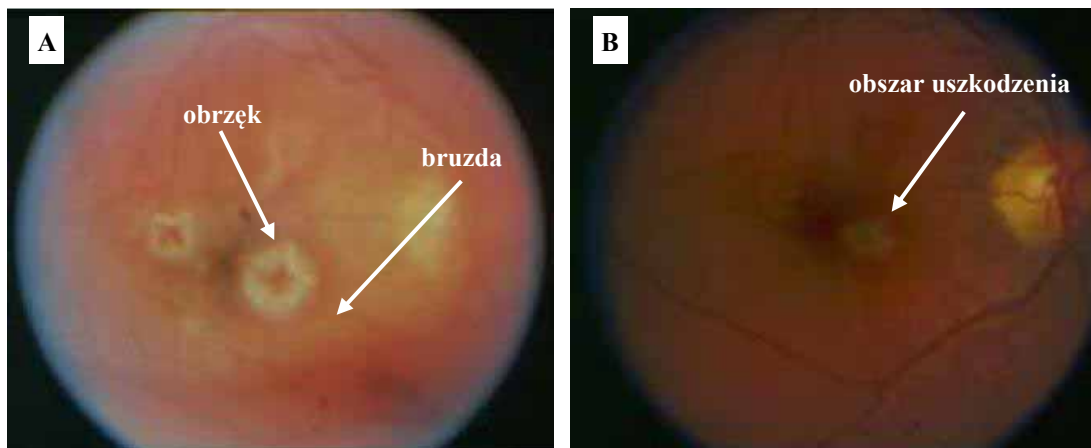
Ze względu na fakt, iż promieniowanie generowane przez laser neodymowy jest silnie ogniskowane przez gałkę oczną, w większości przypadków niezamierzona ekspozycja na to promieniowanie powoduje uszkodzenia właśnie narządu wzroku. Jednakże w przypadku wysokich mocy/energii promieniowania generowanego przez laser neodymowy może dojść do wystąpienia uszkodzeń skóry.

Na rysunku 11. przedstawiono uszkodzenie siatkówki oka pod wpływem ekspozycji na promieniowanie lasera neodymowego pracującego w trybie impulsowym. Widoczne są na rysunku bruzdy powstałe w miejscu interakcji promieniowania z tkanką bruzdy, a także obrzęk siatkówki i krwawienie.



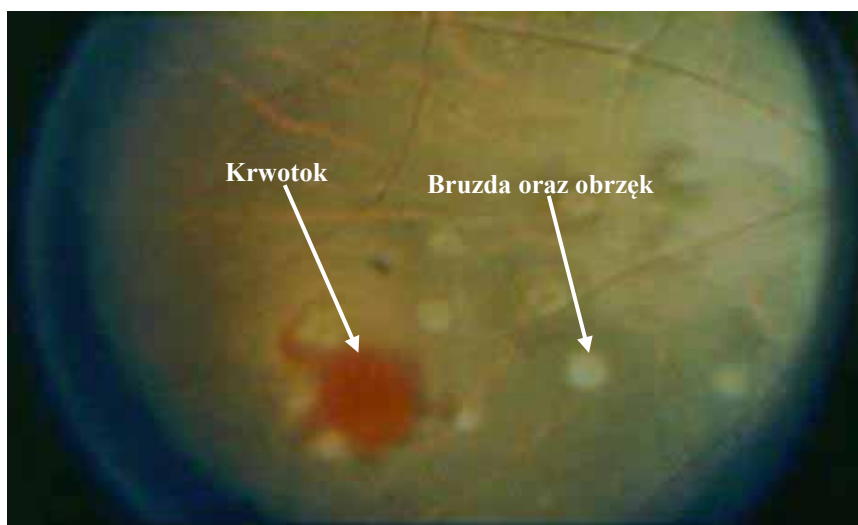
Rys. 11. Uszkodzenia siatkówki oka po ekspozycji na promieniowanie lasera neodymowego:
a) bruzda na całej głębokości siatkówki po ekspozycji na promieniowanie lasera Nd:YAG (długość fali 1064 nm, energia w impulsie 150 mJ, częstotliwość 10 Hz, czas trwania impulsów 10 ns),
b) fotografia uszkodzonej siatkówki z widocznym krwotokiem przed oraz wewnątrz siatkówkowym obrzękiem (Rodney, Hollifield 2003)

Na rysunku 12. przedstawiono skutki ekspozycji promieniowania lasera neodymowego stosowanego w dalmierzach laserowych (laser pracujący w reżymie przełączania dobroti) z zaznaczonymi bruzdami oraz obrzękami siatkówki w miejscach interakcji promieniowania z tkanką. Na rysunku 12b przedstawiono tę samą siatkówkę po kilku tygodniach od jej uszkodzenia – widoczny jest powstały w wyniku ekspozycji krwotok oraz liczne nierówności w strukturze siatkówki.



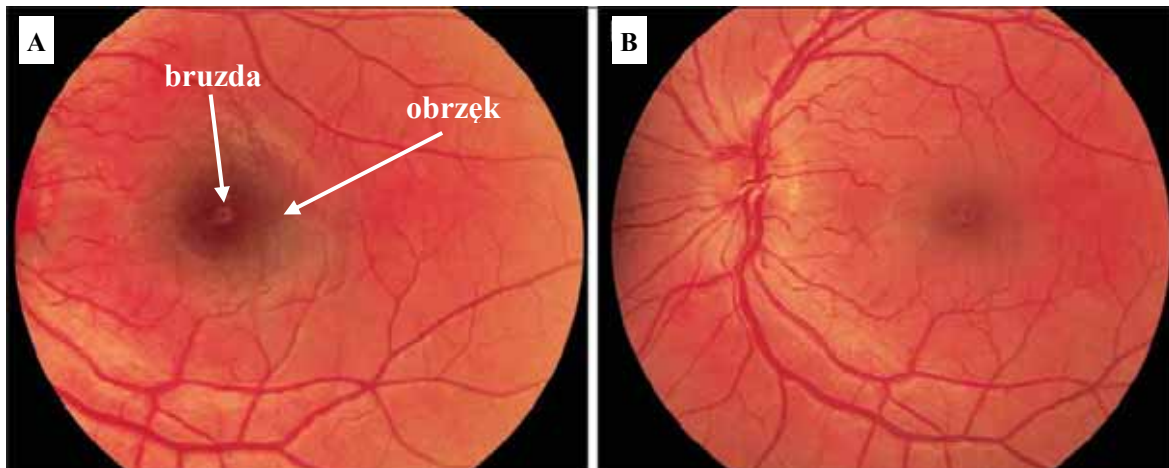
Rys. 12. a) Fotografia siatkówki po kilkakrotnej ekspozycji na promieniowanie lasera Nd:YAG umieszczonego w dalmierzu; b) fotografia tej samej siatkówki po kilku tygodniach (Rodney, Hollifield 2003)

Skutki absorpcji promieniowania lasera neodymowego w nabłonku pigmentowym siatkówki przedstawiono na rysunku 13. Powstałe uszkodzenia (bruzdy oraz obrzęk) są widoczne jako białe oraz kremowe plamy, dodatkowo widoczny jest krwotok powstały po ekspozycji.



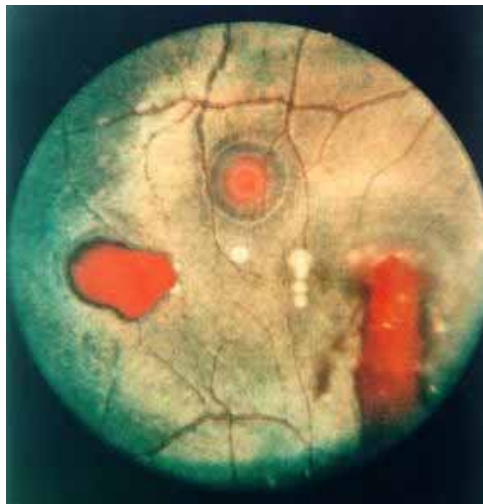
Rys. 13. Przebarwienie siatkówki wywołane wylewem powstałym na skutek uszkodzenia promieniowaniem laserowym (Rodney, Hollifield 2003)

Na rysunku 14. przedstawiono skutek ekspozycji oka na szereg impulsów lasera ND:YAG. Osoba poszkodowana zaobserwowała $2 \div 3$ błyski żółtego światła w czasie ekspozycji na promieniowanie laserowe. Ostrość widzenia w lewym oku kilka godzin po zdarzeniu wynosiła 20/50, natomiast po kilku dniach – 20/200. Ostrość widzenia powróciła do stanu 20/15 po dwóch miesiącach od wystąpienia uszkodzenia (Martin i in. 2004).



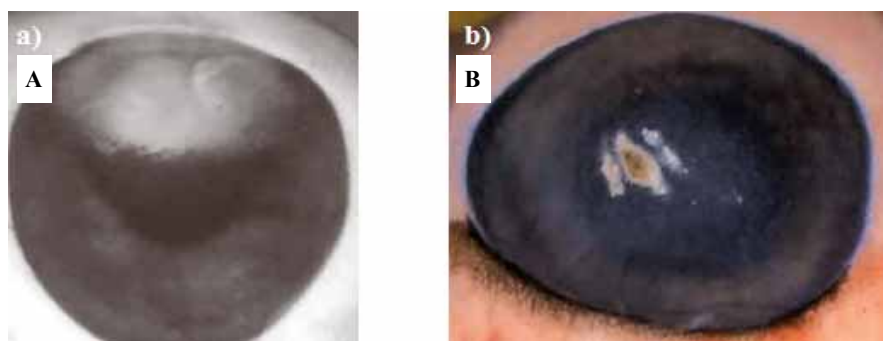
Rys. 14. Łagodne uszkodzenie siatkówki oka promieniowaniem lasera Nd:YAG: a) cztery dni po wypadku, widoczny jest obrzęk w okolicach plamki żółtej otoczony wylewem wewnątrzsiatkówkowym, b) miesiąc po wypadku, obrzęk oraz krwotok częściowo zaniknęły, pozostało niewielkie przebarwienie wokół plamki żółtej (*Martin i in. 2004*)

Na rysunku 15. przedstawiono skutki oddziaływania promieniowania lasera Nd:YAG na siatkówkę oka mały. Jasne plamy to termiczne uszkodzenia siatkówki. Przy większych energiach promieniowania występuje krwawienie w warstwach siatkówki lub do ciała szklanego, co jest widoczne jako czerwone plamy.



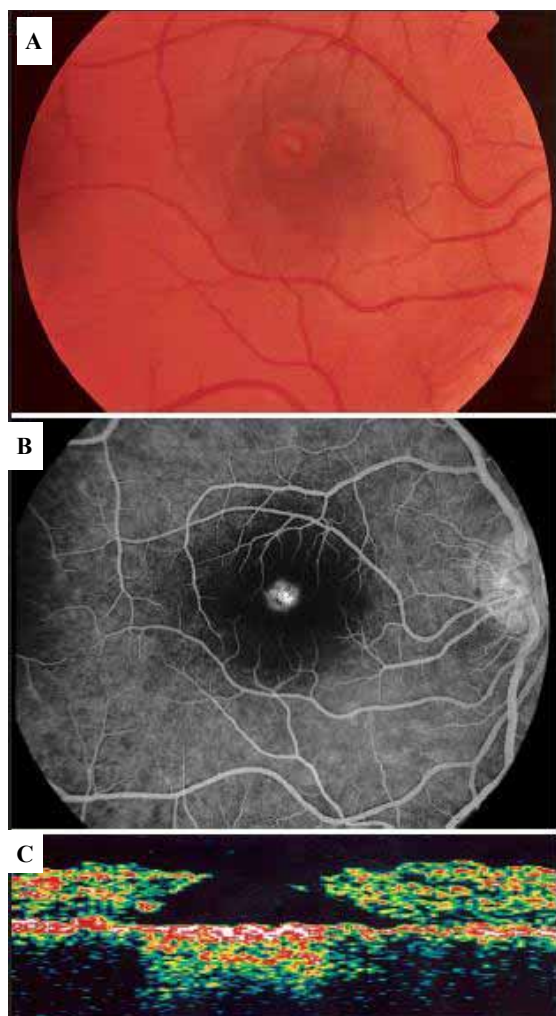
Rys. 15. Uszkodzenia siatkówki oka mały promieniowaniem lasera Nd:YAG (*Trager 2007*)

Na rysunku 16.a przedstawiono uszkodzony w wyniku koagulacji przedni odcinek oka zwierzęcego. Koagulacja została wywołana ekspozycją na promieniowanie lasera Nd:YAG o mocy 100 W przez 1 s (dawka 100 J). Zniszczeniu uległa siatkówka z powodu wysokiej transmisji promieniowania o tej długości fali przez układ optyczny oka. Na rysunku 16.b przedstawiono niszczący skutek krótkiej (około 0,5 s) ekspozycji oka na promieniowanie lasera CO₂ o mocy 60 W (dawka 30 J). W miejscu oddziaływania można nawet zauważyć na rogówce odwzorowaną strukturę modów wiązki laserowej.



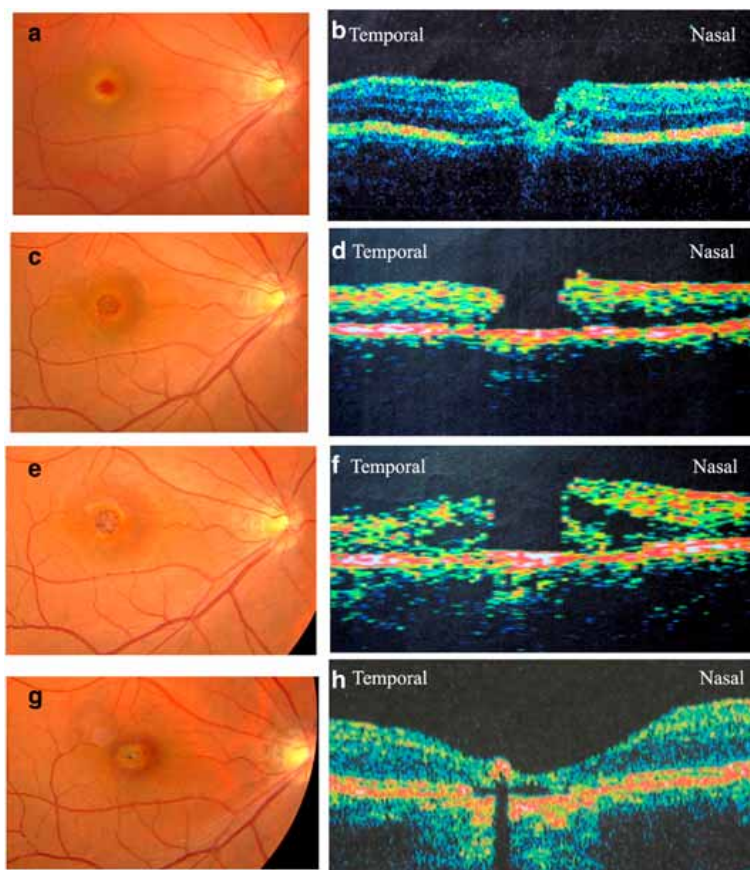
Rys. 16. a) uszkodzenie oka wywołane laserem Nd:YAG z widoczną koagulacją przedniego odcinka oka;
 b) uszkodzenie oka wywołane laserem CO₂ z widocznym odwzorowaniem struktury modów wiązki laserowej (Trager 2007)

Na rysunku 17. przedstawiono kolejny przykład uszkodzenia oka promieniowaniem lasera neodymowego. Pracownik techniczny spojrział bezpośrednio w wiązkę lasera pochodzącą z dalmierza, pomimo etykiet ochronnych oraz przeszkolenia z zakresu bezpieczeństwa obsługi urządzeń laserowych. U pracownika stwierdzono całkowitą utratę zdolności widzenia uszkodzonym okiem z niewielką poprawą po około 5 min. Po około 18 h ostrość widzenia wynosiła 20/150 przy obfitym krwawieniu z siatkówki oraz wycieku części płynu komory przedniej. Podczas kolejnego miesiąca ustało krwawienie z komory przedniej i ostrość poprawiła się do 20/70. Po upływie roku ostrość widzenia wynosiła 20/40, a po dwóch latach – 20/30.



Rys. 17. Zdjęcie siatkówki 10 tygodni po urazie: a) widoczna jest bruzda na całej głębokości siatkówki otoczona przebarwieniem, b) obraz uzyskany metodą angiografii fluorescencyjnej, widoczny wyraźny ubytek w strukturze siatkówki otoczony obrzękiem, c) obraz uzyskany metodą OCT przedstawiający przekrój bruzdy powstałej w wyniku działania promieniowania laserowego (Martin i in. 2004)

Skutek oddziaływania promieniowania laserowego zależy bardzo silnie od czasu trwania impulsów laserowych, a tym samym od mocy szczytowej impulsu. Wynika to z faktu, iż ta sama energia jest dostarczana w znacznie krótszym czasie. W ekstremalnych, aczkolwiek często spotykanych przypadkach przy bardzo krótkich impulsach promieniowania (rzędu 100 ns), może dojść do zjawiska ablacji tkanki i powstania głębokiej bruzdy. Dodatkowym wynikiem procesu ablacji jest silny krwotok spowodowany brakiem oddziaływań termicznych w sąsiedztwie powstałej bruzdy. Skutki oddziaływania impulsów o różnych czasach trwania przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Obrażenia wywołane pojedynczym impulsem lasera Nd:YAG o czasie trwania: a) 450 μm , b) 100 ns, c) 10 ns, przy jednoczesnym założeniu jednakowej energii we wszystkich impulsach (d) obraz OCT po 12 miesiącach od operacji oka uszkodzonego impulsem 100 ns (Martin i in. 2004)

Krótsze impulsy przy tej samej energii impulsu charakteryzują się znacznie większymi mocami szczytowymi promieniowania. Na rysunku 18.a widoczny jest skutek oddziaływania stosunkowo długiego impulsu (450 μm) na siatkówkę. W wyniku ekspozycji doszło do termicznego uszkodzenia powierzchni siatkówki, na obrazie OCT widać wyraźnie skoagulowaną tkankę. W przypadku impulsów krótszych 100 oraz 10 ns widać wyraźnie (rys. 18.b i c), iż w wyniku ekspozycji tkanki na promieniowanie laserowe doszło do procesu ablacji polegającego na oderwaniu części tkanki od podłoża. W tych przypadkach obrazy OCT potwierdzają brak występowania skoagulowanej tkanki w sąsiedztwie miejsca interakcji.

Laser CO₂

Laser CO₂ jest laserem gazowym generującym promieniowanie o długości fali równej 10 600 nm, a zatem w zakresie dalekiej podczerwieni (IR-C). Lasery CO₂, podobnie jak inne lasery gazowe, charakteryzują się bardzo małym kątem rozbieżności, a tym samym bardzo małymi rozmiarami

poprzecznymi wiązki, co przekłada się na ekstremalnie wysokie wartości gęstości mocy/energii wiązki.

Laser CO₂ jest jednym z najpowszechniej wykorzystywanych laserów. Stosowany jest w przemyśle, zarówno cywilnym, jak i wojskowym, w medycynie oraz w nauce. Ze względu na fakt, iż promieniowanie generowane przez laser CO₂ przypada na zakres dalekiej podczerwieni, to w przypadku analizy zagrożeń tym promieniowaniem wyróżnia się jedynie zagrożenia termiczne, ponieważ skutki fotochemiczne nie występują. Dodatkowo, zgodnie z rysunkiem 9. promieniowanie to nie jest transmitowane przez elementy budowy oka, a zatem interakcja promieniowania z gałką oczną zachodzi w jej zewnętrznych warstwach (w rogówce).

Lasery CO₂ w chwili obecnej są stosowane w takich procesach technologicznych, jak: cięcie, spawanie czy hartowanie. Wszystkie te urządzenia należą do IV klasy bezpieczeństwa, a zatem potencjalne zagrożenie może stanowić zarówno wiązka bezpośrednia, jak również rozproszona. W chwili obecnej komercyjnie dostępne lasery przemysłowe generują wiązkę ciągłą o mocy rzędu 100 W ÷ 10 kW. Lasery te charakteryzują się bardzo dużymi mocami generowanego promieniowania, dlatego najczęściej w trakcie ich obsługi dochodzi do uszkodzeń ciała wywołanych ekspozycją na to promieniowanie.

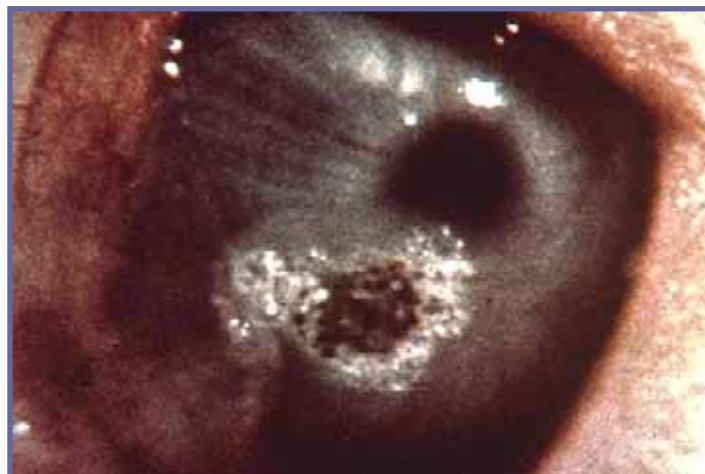
Stosowane w przemyśle materiały metaliczne często charakteryzują się prawie zwierciadlanym odbiciem promieniowania w zakresie dalekiej podczerwieni przy stosunkowo małej absorpcji. Wraz ze wzrostem temperatury metal zaczyna zbliżać się do osiągnięcia fazy ciekłej, przy nieznacznym wzroście absorpcji promieniowania. Sytuacja ta nie zmienia się aż do osiągnięcia wartości strumienia progowego wynoszącego 10⁵ ÷ 10⁷ W/cm² w większości materiałów. Powyżej tej wartości energia absorbowana w materiale rośnie bardzo znacznie, co skutkuje powstawaniem powierzchniowej plazmy. Z punktu widzenia bezpieczeństwa ilość rozpraszanego promieniowania znacznie się zmniejsza po przekroczeniu wartości strumienia progowego. Niezwykle istotne jest stosowanie gazów neutralnych w trakcie formowania się plazmy, w celu minimalizacji możliwego jej wpływu na odbijanie wiązki laserowej.

Skutki ekspozycji skóry ręki na promieniowanie odbite, emitowane przez laser CO₂ podczas procesu cięcia blachy stalowej, przedstawiono na rysunku 19. Pracownik przez pewien czas przyglądał się procesowi cięcia blachy stalowej w odległości około pół metra od miejsca interakcji promieniowania laserowego z obrabianym materiałem. Widoczne jest uszkodzenie termiczne skóry dłoni objawiające się zaczerwienieniem, obrzękiem oraz miejscowo występującą koagulacją tkanki. Dodatkowo pracownik, który doznał obrażeń skóry w wyniku ekspozycji na promieniowanie, skarżył się na silne pieczenie ręki.



Rys 19. Uszkodzenie termiczne skóry wywołane ekspozycją na odbite promieniowanie lasera CO₂ podczas procesu cięcia blachy stalowej (Laser Professionals)

Promieniowanie lasera CO₂ (daleka podczerwień) nie jest transmitowane ani skupiane przez elementy budowy gałki ocznej, dlatego też w przypadku ekspozycji oka na to promieniowanie zagrożoną tkanką jest rogówka. Może bowiem dojść do jej zaczerwienienia, koagulacji, a także, co w przypadku lasera CO₂ występuje dość często, zwęglenia tkanki. Na rysunku 20. przedstawiono skutek ekspozycji oka na promieniowanie lasera CO₂ o mocy 10 W. Na rysunku wyraźnie jest widoczny obszar zwęglonej oraz skoagulowanej tkanki rogówki. Uszkodzenie takie nie powoduje całkowitej utraty wzroku, ale jest niezwykle bolesne, a także znacznie pogarsza komfort widzenia.



Rys. 20. Uszkodzenie termiczne rogówki oka wywołane ekspozycją promieniowaniem lasera CO₂ (Laser Professionals)

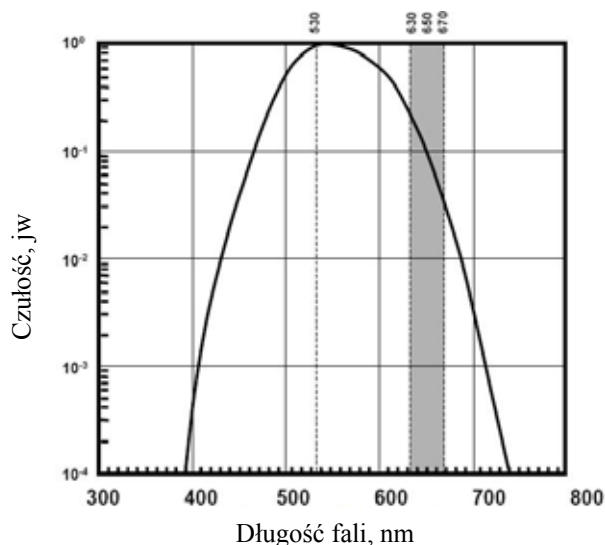
Objawem ekspozycji na promieniowanie lasera CO₂ może być piekący ból w miejscu ekspozycji na rogówce bądź spojówce. Skutkiem oddziaływania termicznego mogą być nieregularności powierzchni bądź biała nieprzezroczysta plama. Jeżeli oparzenie jest niewielkie i ograniczone do zewnętrznej warstwy komórkowej, jego wygojenie nastąpi w ciągu około 48 h. Głębsze oparzenia mogą powodować trwałe uszkodzenia (Trager 2004).

Wskaźniki laserowe

Obecnie najczęściej są stosowane dwa rodzaje wskaźników laserowych:

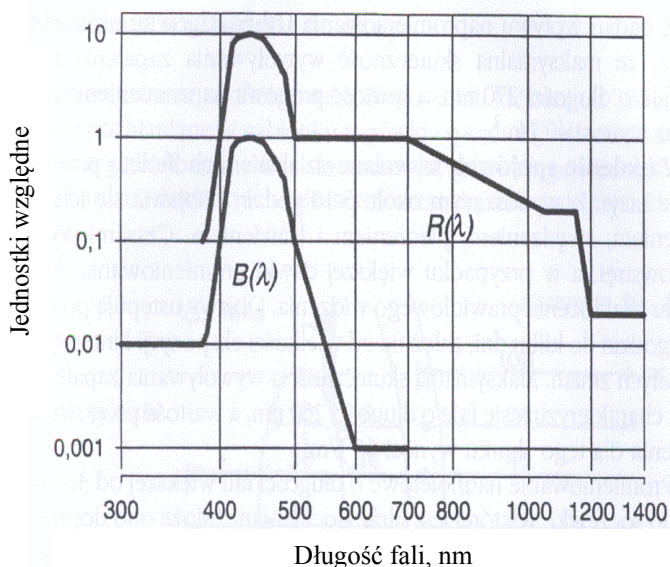
- wskaźniki czerwone (generujące promieniowanie w zakresie 630 ÷ 680 nm) wyposażone w diodę laserową z GaAsP oraz soczewkę kolimującą
- wskaźniki zielone oparte na bazie lasera neodymowego (1064 nm) pompowanego diodą półprzewodnikową (808 nm), którego promieniowanie jest następnie przetwarzane na drugą harmoniczną (532 nm) przy wykorzystaniu kryształu KTP.

Ze względu na fakt, iż ludzkie oko jest najbardziej czułe na promieniowanie z zakresu koloru zielonego, dlatego też lasery zielone są postrzegane jako bardziej jaskrawe, co wynika z charakterystyki czułości oka ludzkiego przedstawionej na rysunku 21.



Rys. 21. Krzywa czułości ludzkiego oka (wyrażona w jednostkach względnych), (van Nakagawara, Montgomery 2001)

O szkodliwości tego promieniowania dla siatkówki decyduje jednak względna skuteczność widmowa uszkodzeń termicznego i fotochemicznego siatkówki przedstawiona na rysunku 22. Wynika z niej, że lasery zielone są bardziej niebezpieczne ze względu na zagrożenie fotochemiczne.



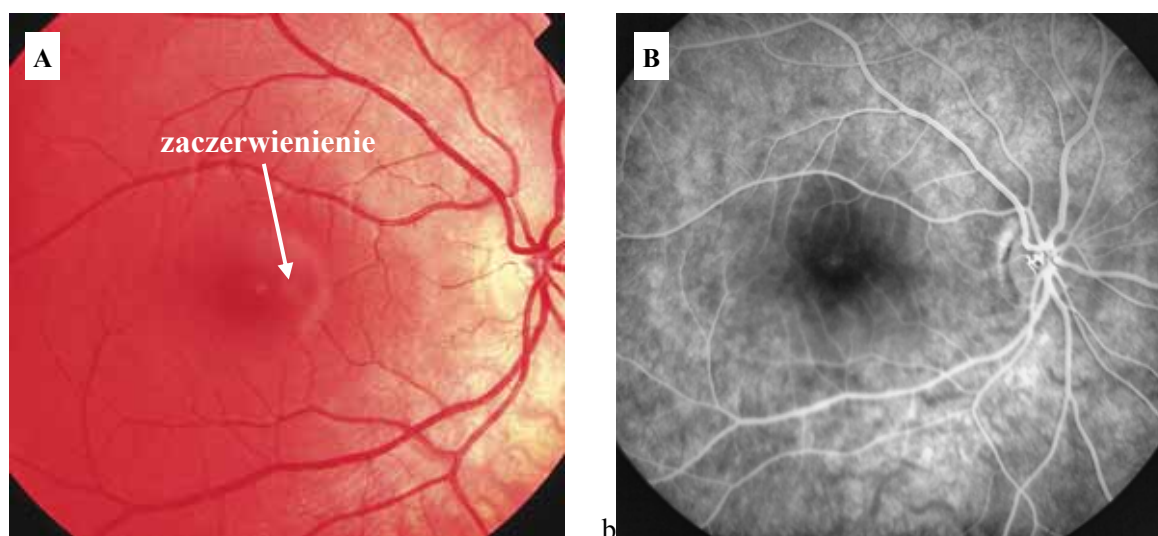
Rys. 22. Krzywe skuteczności oddziaływania: fotochemicznego $R(\lambda)$ oraz termicznego $B(\lambda)$, (PN-T-06704: 2003)

Lasery wykorzystywane jako wskaźniki charakteryzują się znacznie mniejszymi mocami w porównaniu do laserów przemysłowych lub medycznych. Praktycznie wszystkie generują wiązkę ciągłą o mocy od 1 mW do nawet 0,5 W. Moc wskaźników dopuszczonych do użytku w trakcie wykładów oraz seminariów nie może jednak przekraczać 5 mW. W przypadku laserów czerwonych zagrożenie stanowi jedynie wiązka widzialna, a w przypadku laserów zielonych możliwa jest ekspozycja na promieniowanie użyteczne (zielone), a także na promieniowanie diody półprzewodnikowej generującej promieniowanie podczerwone (808 nm).

Ze względu na fakt, iż lasery te generują promieniowanie z zakresu długości fal $400 \div 1400$ nm, ekspozycja na to promieniowanie może prowadzić do uszkodzeń siatkówki oka. Promieniowanie z tego zakresu jest pochłaniane głównie przez melaninę.

Krótkotrwała ekspozycja oczu na promieniowanie wskaźnika laserowego generującego promieniowanie o mocy < 1 mW powoduje wystąpienie takich krótkotrwałych skutków, jak różnego stopnia olśnienie. Przy ekspozycji tkanek oka promieniowaniem z zakresu widzialnego poszkodowany zauważy jasny błysk, a następnie wystąpią powidoki koloru dopełniającego do tego, jakim oświetlono oko, np. przy ekspozycji na promieniowanie o długości fali 532 nm zostanie zauważony zielony błysk oraz wywołane przez niego czerwone powidoki.

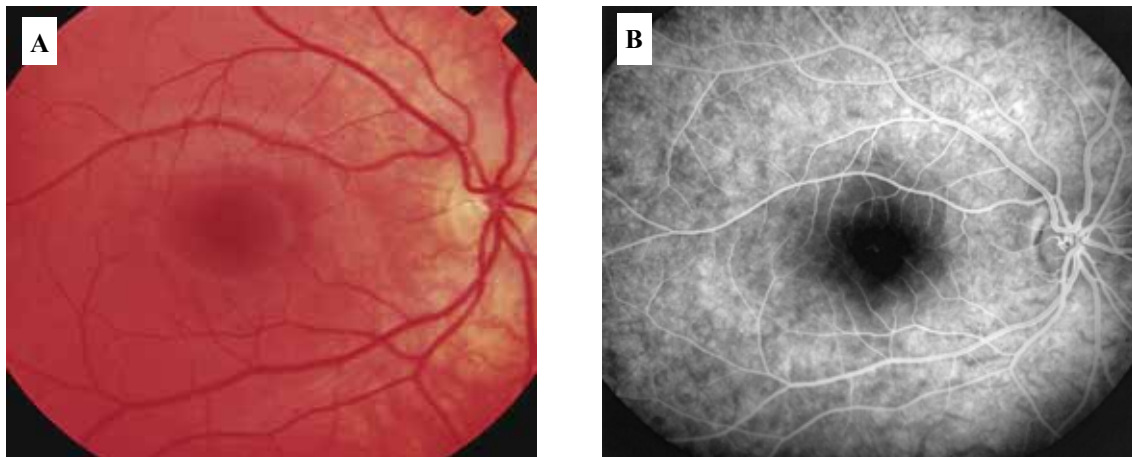
Najczęstszymi przyczynami powstania uszkodzenia narządu wzroku promieniowaniem pochodzącym ze wskaźnika laserowego jest spojrzenie bezpośrednio w wiązkę lasera.



Rys. 23. Uszkodzona promieniowaniem czerwonego wskaźnika laserowego siatkówka: a) fotografia siatkówki w dniu uszkodzenia, b) obraz fluorescencyjny uszkodzonej siatkówki (*Sell, Bryan 1999*)

Na rysunku 23. przedstawiono siatkówkę oka 11-letniej dziewczynki, która przez kilka milisekund była ekspozowana na promieniowanie wskaźnika laserowego klasy 3R generującego promieniowanie czerwone (670 nm) o mocy < 10 mW (*Sell, Bryan 1999*). Widoczne jest wyraźne zaczerwienienie na powierzchni siatkówki. Na rysunku 23.b przedstawiono fluorescencyjny obraz uszkodzonej siatkówki z wyraźnie widocznym dużym obrzękiem na jej powierzchni. W przeciągu kilku tygodni od uszkodzenia dziewczynka narzekała głównie na pogorszoną ostrość widzenia, dopiero po 6 miesiącach wzrok powrócił do stanu sprzed wypadku, jednakże przebarwienie pigmentu siatkówki utrzymywało się ponad rok.

Do podobnego zdarzenia doszło także podczas manewrów wojskowych przeprowadzanych przez armię amerykańską, podczas których jeden z żołnierzy skarżył się na nagłe pogorszenie zdolności widzenia. Po wykonaniu badań i przeprowadzeniu dochodzenia okazało się, że przez krótki czas (0,25 s – czas odruchu bezwarunkowego oka) jego oko zostało poddane działaniu czerwonego wskaźnika laserowego (650 nm) o mocy < 5 mW. Pełna zdolność widzenia w uszkodzonym oku powróciła dopiero po około 6 miesiącach od wypadku. Na rysunku 24. przedstawiono zdjęcia siatkówki wykonane krótko po wystąpieniu ekspozycji, na których widać zaczerwienienie oraz obrzęk wokół obszaru interakcji.

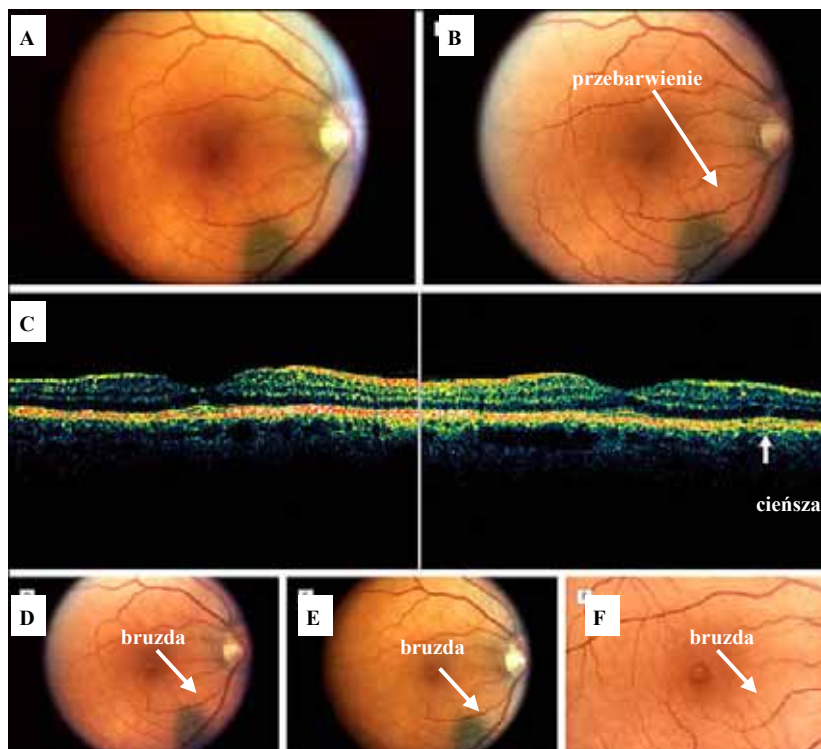


Rys. 24. Uszkodzona siatkówka: a) fotografia w dniu uszkodzenia, b) obraz fluorescencyjny uszkodzonej siatkówki (Sell, Bryan 1999)

Zielone wskaźniki laserowe są zminiaturyzowanymi laserami ciała stałego, które charakteryzują się znacznie lepszymi, w porównaniu do wskaźników czerwonych, z punktu widzenia optycznego, takimi parametrami wiązki, jak rozbieżność oraz parametr M^2 . Z tego względu większa część promieniowania może dostać się do oka i być znacznie lepiej przez nie ogniskowana, a tym samym może powodować znacznie poważniejsze uszkodzenia.

W przypadku ekspozycji oczu na promieniowanie lasera zielonego możliwe są dwa rodzaje uszkodzeń siatkówki, tj. fotochemiczne oraz termiczne. Przy mocy (< 1 mW) w wyniku ekspozycji oka na promieniowanie zielonego wskaźnika uczucie chwilowego oślepienia jest znacznie dłuższe niż w przypadku lasera czerwonego, ze względu na znacznie większą czułość narządu wzroku na to promieniowanie. W przypadku laserów zielonych o mocy powyżej 1 mW może dojść do poważnych uszkodzeń wzroku.

Na rysunku 25. przedstawiono wynik ekspozycji oka na promieniowanie wskaźnika laserowego klasy 3R o mocy promieniowania < 10 mW generującego na długości fali 532 nm (Robertson i in. 2005).



Rys. 25. Obraz siatkówki poddanej 60-sekundowej ekspozycji na promieniowanie laserowe pochodzące ze wskaźnika laserowego: a) zdrowe oko, b) 24 h po ekspozycji, c) obraz OCT przed ekspozycją i po ekspozycji, d) 20 dni po ekspozycji, e) 60 dni po ekspozycji, f) dwukrotne powiększenie obszaru uszkodzonego ze zdjęcia (Robertson i in. 2005)

W przypadku długości fali 532 nm współczynnik absorpcji melaniny jest około 10-krotnie mniejszy niż dla promieniowania 630 ÷ 680 nm, co powoduje znacznie głębsze wnikanie tego promieniowania w obszar tkanki. W jego wyniku zostają uszkodzone warstwy w głębi tkanki, podczas gdy na powierzchni nie ma praktycznie śladu wystąpienia uszkodzenia. Dopiero po pewnym czasie w wyniku obumierania tkanki od wewnątrz pojawiają się zmiany na powierzchni, dlatego też bardzo często w takich przypadkach dopiero po pewnym czasie człowiek zdaje sobie sprawę z powstałego uszkodzenia.

Powszechna dostępność wskaźników laserowym generujących promieniowanie o mocy do 0,5 W (przykładowo wiązka o mocy 200 mW i długości fali 532 nm jest widoczna gołym okiem na odległość ponad 10 km) spowodowała pojawianie się nowych potencjalnych zagrożeń związanych z ekspozycją na promieniowanie laserowe, nawet dla osób znajdujących się w dużej odległości od źródła. Jednym z nich jest przypadkowe oświetlenie kokpitu samolotu takim laserem. Na rysunku 26. przedstawiono symulację przeprowadzoną przez siły zbrojne Stanów Zjednoczonych ilustrującą kokpit samolotu, na którego szybę pada promieniowanie generowane przez wskaźnik laserowy (przy założeniu wartości natężenia napromienienia poniżej wartości powodującej zagrożenie). Promieniowanie to może więc w znacznym stopniu utrudnić obsłudze samolotu poprawne manewrowanie maszyną.



Rys. 26. Widok z perspektywy kokpitu samolotu oświetlonego promieniowaniem laserowym z zakresu widzialnego o niskiej (nieprzekraczającej wartości MDE) mocy (van Nakagawara, Mantgomery 2001)

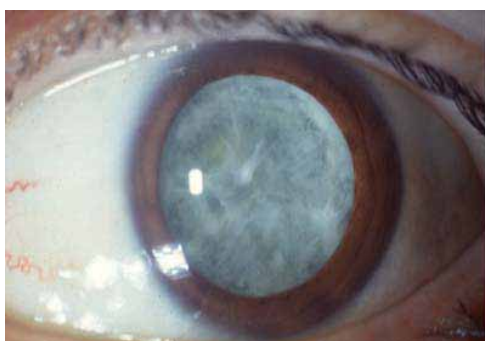
Analiza medyczna przypadków uszkodzenia wzroku wywołanego ekspozycją na promieniowanie laserowe pozwala stwierdzić, iż łagodne oparzenie siatkówki objawia się żółtymi bądź szarymi przebarwieniami w postrzeganym obrazie. Jeżeli nastąpi bezpośrednie spojrzenie w wiązkę laserową, może dojść do oparzenia siatkówki w obszarze dołka środkowego znajdującego się w centralnym obszarze plamki żółtej. Uszkodzenie tego obszaru początkowo objawia się jako zamglona biała plama przesłaniająca centralny obszar widzenia, a po kilku tygodniach może przekształcić się w czarną plamę. Jednak poszkodowany po pewnym czasie może przestać zdawać sobie sprawę z powstałego uszkodzenia siatkówki podczas normalnego widzenia. Skutek ten jest spowodowany faktem, iż mózg automatycznie ignoruje sygnały pobierane z uszkodzonego oka, przyporządkowując funkcję widzenia oku zdrowemu. Uszkodzenia peryferyjnych obszarów siatkówki będą dostrzegane subiektywnie, a w przypadku niewielkich uszkodzeń mogą nawet nie zostać wykryte podczas badań oka.

Zagrozenie fotochemiczne

Zdecydowana większość uszkodzeń tkanek biologicznych promieniowaniem laserowym jest wynikiem oddziaływań termicznych. W zakresie spektralnym $180 \div 600$ nm może jednak dodatkowo występować zagrożenie fotochemiczne.

W przypadku promieniowania laserowego zagrożenia fotochemiczne występują znacznie rzadziej i nie zawsze kojarzy się je z ekspozycją na promieniowanie laserowe. Jednym z najczęstszych powikłań o charakterze fotochemicznym wywołanych promieniowaniem laserowym jest zaćma. Promieniowanie odbite generowane przez lasery ekscymerowe, w szczególności laser XeCl (ksenonowy) generujący promieniowanie o długości fali 308 nm, znacznie przyspieszają proces powstawania zaćmy. Dodatkowo uszkodzenia o charakterze fotochemicznym to zapalenie rogówki i spojówki, a także różnego rodzaju nowotwory.

Laser XeCl generuje promieniowanie o długości fali 308 nm. Promieniowanie to jest bardzo dobrze absorbowane przez soczewkę, a jednocześnie przepuszczane przez rogówkę. Dlatego pracownicy obsługujący tego typu lasery i niestosujący okularów ochronnych skarżą się już po roku na objawy zaćmy. Na rysunku 27. przedstawiono oko pacjenta z zaćmą.



Rys. 27. Oko pacjenta, u którego stwierdzono zaćmę (Trager 2007)

Innymi bardzo poważnymi skutkami reakcji fotochemicznych wywołanych promieniowaniem laserowym są nowotwory. Są to najczęściej różnego rodzaju czerniaki lub nowotwory powstające w okolicach oczu, np. na powiekach. Na rysunku 28. przedstawiono przykłady nowotworów powstałych w wyniku ekspozycji na promieniowanie laserowe.



Rys. 28. Przykłady nowotworów powstałych w wyniku ekspozycji na promieniowanie laserowe (Konieczny i in. 2007)

Przy niskich wartościach napromienienia/natężenia promieniowania z zakresu $400 \div 600$ nm i czasach ekspozycji powyżej kilku sekund może wystąpić zagrożenie fotochemiczne siatkówki. Temperatura eksponowanej przez promieniowanie tkanki podniesie się w nieznacznym (niemierzalnym) stopniu, inicjując tym samym procesy fotochemiczne. Jednym ze skutków takiego oddziaływania jest zapalenie siatkówki. Poszczególne fotoreceptory pod wpływem procesów fotochemicznych stają się niezdolne do pełnienia swoich normalnych funkcji. Zapalenie siatkówki może prowadzić nawet do utraty wzroku (Trager 2007).

Na rysunku 29. przedstawiono przykłady zapalenia spojówki (rys. 29.) oraz rogówki (rys. 29.b) w wyniku ekspozycji na promieniowanie laserowe. Objawami tego typu uszkodzeń jest zaczerwienienie oka połączone z bólem i pogorszeniem ostrości widzenia.



Rys. 29. a) zapalenie spojówki oka, b) zapalenie rogówki oka (Konieczny i in. 2007)

CHARAKTERYSTYKA KRYTERIÓW OCENY ZAGROŻENIA PROMIENIOWANIEM LASEROWYM

W celu ochrony ludzkiego zdrowia przed zagrożeniami związanymi z promieniowaniem laserowym określono w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej wartość maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji (MDE). Określa ona maksymalny poziom promieniowania laserowego, na którego ekspozycję może zostać wystawione oko lub skóra bez konsekwencji uszczerbku na zdrowiu. Wartości MDE są zależne od: długości fali promieniowania, czasu trwania impulsów laserowych lub czasu ekspozycji, rodzaju tkanki poddanej ekspozycji, a także kąta widzenia źródła dla promieniowania z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni ($400 \div 1400$ nm). Wartość MDE została określona jako 1/10 dozy efektywnej 50% (DE-50). Parametrem DE-50 określa się dawkę promieniowania powodującą w 50% wypadków uszkodzenie tkanki spowodowane ekspozycją na to promieniowanie (Trager 2007).

Charakterystyka kryteriów oceny zagrożenia oraz wykaz wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji (MDE) na promieniowanie laserowe zawartych w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej

Wartości maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji (MDE) zawarte w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Rozporządzenie... 2002) 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 ÷ 1400 nm.

Wartości MDE są bardzo zróżnicowane i w rozporządzeniu zostały zestawione w trzech tabelach. Maksymalne dopuszczalne ekspozycje oka na promieniowanie laserowe przedstawiono w dwóch tabelach: dla źródeł punktowych (tab. 2.) i dla źródeł rozciągniętych (tab. 3.). Natomiast wartości MDE skóry na promieniowanie laserowe zestawiono w jednej tabeli (tab. 4.).

Maksymalna dopuszczalna ekspozycja oka i skóry dla źródeł laserowych emitujących promieniowanie impulsowe powtarzalne lub promieniowanie zmodulowane jest określona przez następujące warunki:

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

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

Tabela 2.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) oka na promieniowanie laserowe źródeł punktowych (patrzenie w wiązkę), (Rozporządzenie... 2002)

Czas ekspozycji t (s)		10^{-9} do 10^{-7}	10^{-7} do 10^{-6}	10^{-6} do $1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$ do $5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$ do 10^{-4}	10^{-4} do 10^{-3}	10^{-3} do 10^{-2}	10^{-2} do $3 \cdot 10^{-2}$
Długość fali λ (nm)									
180 do 302,5		$30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$							
302,5 do 315	$3 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$C_1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ $t < T_1$		$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ $t > T_1$			$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		

cd. tab. 2

Czas ekspozycji t (s)	< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ do 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ do 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ do 1,8 · 10 ⁻⁵	1,8 · 10 ⁻⁵ do 5 · 10 ⁻⁵	5 · 10 ⁻⁵ do 10	10 do 10 ³	10 ³ do 10 ⁴	10 ⁴ do 3 · 10 ⁴
Długość fali λ (nm)									
315 do 400		C ₁ J · m ⁻²					10 ⁴ J · m ⁻²	10 W · m ⁻²	
400 do 550							100 J · m ⁻²	10 ⁻² W · m ⁻²	
550 do 700	5 · 10 ⁶ W · m ⁻²	5 · 10 ⁻³ J · m ⁻²		18 · t ^{0,75} J · m ⁻²			C ₃ · 10 ² J · m ⁻² t > T ₂		C ₃ · 10 ⁻² W · m ⁻²
							18 · t ^{0,75} J · m ⁻²	t < T ₂	
700 do 1050	5 · C ₄ · 10 ⁶ W · m ⁻²	5 · 10 ⁻³ · C ₄ J · m ⁻²		18 · C ₄ · t ^{0,75} J · m ⁻²			3,2 · C ₄ W · m ⁻²		
1050 do 1400	5 · 10 ⁷ W · m ⁻²	5 · 10 ⁻² J · m ⁻²			90 · t ^{0,75} J · m ⁻²		16 W · m ⁻²		
1400 do 1530	10 ¹¹ W · m ⁻²	100 J · m ⁻²	5600 · t ^{0,25} J · m ⁻²			1000 W · m ⁻²			
1530 do 1550		1,0 · 10 ⁴ J · m ⁻²	5600 · t ^{0,25} J · m ⁻²						
1550 do 10 ⁶		100 J · m ⁻²	5600 · t ^{0,25} J · m ⁻²						

Tabela 3.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) oka na promieniowanie laserowe źródeł rozciągłych (Rozporządzenie... 2002)

Czas ekspozycji t (s)	< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ do 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ do 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ do 10	10 do 10 ³	10 ³ do 10 ⁴	10 ⁴ do 3 · 10 ⁴	
Długość fali λ (nm)								
180 do 302,5		30 J · m ⁻²						
302,5 do 315	3 · 10 ¹⁰ W · m ⁻²	C ₂ J · m ⁻² t > T ₁				C ₂ J · m ⁻²		
315 do 400		C ₁ J · m ⁻² t < T ₁				10 ⁴ J · m ⁻²	10 W · m ⁻²	
400 do 550	10 ¹¹ W · m ⁻² sr ⁻¹	10 ⁵ · t ^{0,33} J · m ⁻² sr ⁻¹				2,1 · 10 ⁵ J · m ⁻² sr ⁻¹		21 W · m ⁻² sr ⁻¹
550 do 700						2,1 · C ₃ · 10 ⁵ J · m ⁻² sr ⁻¹ t > T ₂		21 · C ₃ W · m ⁻² sr ⁻¹
						3,8 · 10 ⁴ · t ^{0,75} J · m ⁻² sr ⁻¹ t < T ₂		
700 do 1050	10 ¹¹ · C ₄ W · m ⁻² sr ⁻¹	10 ⁵ · C ₄ · t ^{0,33} J · m ⁻² sr ⁻¹			3,8 · 10 ⁴ · C ₄ · t ^{0,75} J · m ⁻² sr ⁻¹	6,4 · 10 ³ · C ₄ W · m ⁻² sr ⁻¹		
1050 do 1400	5 · 10 ¹¹ W · m ⁻² sr ⁻¹	5 · 10 ⁵ · t ^{0,33} J · m ⁻² sr ⁻¹			1,9 · 10 ⁵ · t ^{0,75} J · m ⁻² sr ⁻¹	3,2 · 10 ⁴ W · m ⁻² sr ⁻¹		
1400 do 1530	10 ¹¹ W · m ⁻²	100 J · m ⁻²	5600 · t ^{0,25} J · m ⁻²			1000 W · m ⁻²		
1530 do 1550		1,0 · 10 ⁴ J · m ⁻²	5600 · t ^{0,25} J · m ⁻²					
1550 do 10 ⁶		100 J · m ⁻²	5600 · t ^{0,25} J · m ⁻²					

Tabela 4.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje (MDE) skóry na promieniowanie laserowe (Rozporządzenie ... 2002)

Czas ekspozycji t (s) Długość fali λ (nm)	< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ do 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ do 10	10 do 10 ³	10 ³ do 3·10 ⁴
180 do 302,5	3·10 ¹⁰ W·m ⁻²	30 J·m ⁻²			
302,5 do 315		C ₁ J·m ⁻² t < T ₁	C ₂ J·m ⁻² t > T ₁	C ₂ J·m ⁻²	
315 do 400		C ₁ J·m ⁻²		10 ⁴ J·m ⁻²	10 W·m ⁻²
400 do 1400	2·10 ¹¹ W·m ⁻²	200 J·m ⁻²	1,1·10 ⁴ t ^{0,25} ₂ J·m ⁻²	2000 W·m ⁻²	
1400 do 10 ⁶	10 ¹¹ W·m ⁻²	100 J·m ⁻²	5600 t ^{0,25} J·m ⁻²	1000 W·m ⁻²	

Wartości współczynników korekcyjnych zawartych w tabelach 2., 3. i 4. przedstawiono w tabeli 5., zaś wartości kąta granicznego niezbędnego przy klasyfikowaniu lasera jako źródło punktowe lub rozciągle przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5.

Współczynniki korekcyjne (Rozporządzenie... 2002)

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

Tabela 6.

Wartość kąta granicznego α_{\min} (Rozporządzenie... 2002)

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

Uwagi: α_{\min} należy zwiększyć 1,4 razy, dla 1050 nm ≤ λ ≤ 1400 nm i dla t < 5·10⁻⁵s,
gdzie:

λ – długość fali promieniowania,
t – czas trwania ekspozycji.

Zasięg uszkodzeń spowodowanych ekspozycją na promieniowanie laserowe zależy od długości fali, czasu trwania impulsów laserowych lub czasu ekspozycji, kąta widzenia źródła promieniowania (dla zakresu 400 ÷ 1400 nm). Wprowadzono zatem odpowiednie współczynniki korekcyjne (C_1 , C_2 , C_3 i C_4) oraz punkty czasowe (T_1 i T_2) wykorzystywane przy wyznaczeniu wartości MDE.

Charakterystyka kryteriów oceny zagrożenia oraz wartości granicznych ekspozycji na promieniowanie laserowe zawartych w dyrektywie 2006/25/WE

Najwyższy poziom promieniowania laserowego niepowodujący obrażeń oczu i skóry jest określany w dyrektywie jako wartość graniczna ekspozycji oka lub skóry na promieniowanie laserowe. Ustalone wartości graniczne ekspozycji na promieniowanie laserowe odnoszą się do przypadkowych, krótkotrwałych ekspozycji człowieka na to promieniowanie, a nie do zamierzonych ekspozycji w celach 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 z jej szkodliwym skutkiem dla zdrowia człowieka. Działanie promieniowania laserowego na tkankę ma różny charakter w zależności od gęstości mocy promieniowania oraz od czasu ekspozycji. Parametry te są ze sobą ściśle związane i nie można ich rozpatrywać oddzielnie. Rodzaje zagrożeń dla oka i skóry powodowanych przez promieniowanie laserowe w zależności od długości fali promieniowania przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7.

Rodzaje zagrożeń związanych z poszczególnymi zakresami promieniowania laserowego (dyrektywa 2006/25/WE)

Zakres długości fali, nm	Zakres promieniowania	Zagrożony narząd	Zagrożenie	Wartości graniczne ekspozycji
180 do 400	UV	oko	uszkodzenie fotochemiczne i termiczne	4,7; 4,8
180 do 400	UV	skóra	rumień	4,9
400 do 700	widzialne	oko	uszkodzenie siatkówki	4,7
400 do 600	widzialne	oko	uszkodzenie fotochemiczne	4,8
400 do 700	widzialne	skóra	uszkodzenie termiczne	4,9
700 do 1 400	IRA	oko	uszkodzenie termiczne	4,7; 4,8
700 do 1 400	IRA	skóra	uszkodzenie termiczne	4,9
1 400 do 2 600	IRB	oko	uszkodzenie termiczne	4,7
2 600 do 10 ⁶	IRC	oko	uszkodzenie termiczne	4,7
1 400 do 10 ⁶	IRB, IRC	oko	uszkodzenie termiczne	4,8
1 400 do 10 ⁶	IRB, IRC	skóra	uszkodzenie termiczne	4,9

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.

Wartości graniczne ekspozycji oka i skóry na promieniowanie laserowe są bardzo zróżnicowane i w dyrektywie są zestawione w trzech tabelach. Maksymalne dopuszczalne ekspozycje oka na promieniowanie laserowe przedstawiono w dwóch tabelach – dla krótkich czasów trwania ekspozycji < 10 s (tab. 8.) oraz dla długich czasów trwania ekspozycji, większych od 10 s (tab. 9.). Wartości graniczne ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe zestawiono natomiast w jednej tabeli (tab. 10.).

W tabelach wartości granicznych ekspozycji oka lub skóry na promieniowanie laserowe (tab. 8., 9. i 10.) 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* pochodzą z pomiarów lub mogą być podane przez producenta sprzętu (dyrektywa 2006/25/WE),
- H* – napromienienie to całka natężenia napromienienia liczona za czas dla danego czasu ekspozycji, wyrażone w dżulach na metr kwadratowy ($J \cdot m^{-2}$), (dyrektywa 2006/25/WE),
- G* – zintegrowana luminancja energetyczna to całka luminancji energetycznej za dany czas ekspozycji wyrażona jako energia promieniowania z jednostki powierzchni promieniującej w jednostkowym kącie bryłowym emisji, wyrażona w dżulach na metr kwadratowy na steradian ($J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$), (dyrektywa 2006/25/WE).

Współczynniki korekcyjne stosowane w tabelach 8., 9. i 10 przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 8.

Wartości graniczne ekspozycji oka na promieniowanie laserowe – krótki czas trwania ekspozycji < 10 s (dyrektywa 2002/25/WE)

Długość fali ^a , nm		Apertura ²	Czas trwania, s						
			$10^{-13} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^1$
UVC	180 - 280	1 mm dla $t < 0,3$ s; $1,5 \cdot t^{0,375}$ dla $0,3 < t < 10$ s	$E = 3 \cdot 10^{10} \cdot [W m^{-2}]$ Patrz przypis ^c					$H = 30 [J m^{-2}]$ $H = 40 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 2,6 \cdot 10^{-9}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 60 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 1,3 \cdot 10^{-8}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 100 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 1,0 \cdot 10^{-7}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 160 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 6,7 \cdot 10^{-7}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 250 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 4,0 \cdot 10^{-6}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 400 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 2,6 \cdot 10^{-5}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 630 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 1,6 \cdot 10^{-4}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 10^3 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 1,0 \cdot 10^{-3}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 1,6 \cdot 10^3 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 6,7 \cdot 10^{-3}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 2,5 \cdot 10^3 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 4,0 \cdot 10^{-2}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 4,0 \cdot 10^3 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 2,6 \cdot 10^{-1}$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d $H = 6,3 \cdot 10^3 [J m^{-2}]$; jeżeli $t < 1,6 \cdot 10^0$, to $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$, patrz przypis ^d	
	280 - 302								
	303								
	304								
	305								
	306								
	307								
	308								
	309								
	310								
	311								
	312								
	313								
	314								
UVA	315 - 400		$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [J m^{-2}]$						
Wi- działne i IRA	400 - 700	7 mm	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_E [J m^{-2}]$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_E [J m^{-2}]$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_E [J m^{-2}]$	$H = 18 \cdot t^{0,75} C_E [J m^{-2}]$			
	700 - 1050		$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_A C_E [J m^{-2}]$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_A C_E [J m^{-2}]$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_A C_E [J m^{-2}]$	$H = 18 \cdot t^{0,75} C_A C_E [J m^{-2}]$			
	1050 - 1400		$H = 1,5 \cdot 10^{-3} C_C C_E [J m^{-2}]$	$H = 2,7 \cdot 10^5 t^{0,75} C_C C_E [J m^{-2}]$	$H = 5 \cdot 10^{-2} C_C C_E [J m^{-2}]$		$H = 90 \cdot t^{0,75} C_C C_E [J m^{-2}]$		
IRB i IRC	1400 - 1500	patrz przypis ^b	$E = 10^{12} [W m^{-2}]$ patrz przypis ^c		$H = 10^3 [J m^{-2}]$		$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25} [J m^{-2}]$		
	1500 - 1800		$E = 10^{13} [W m^{-2}]$ patrz przypis ^c		$H = 10^4 [J m^{-2}]$				
	1800 - 2600		$E = 10^{12} [W m^{-2}]$ patrz przypis ^c		$H = 10^3 [J m^{-2}]$		$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25} [J m^{-2}]$		
	2600 - 10^6		$E = 10^{11} [W m^{-2}]$ patrz przypis ^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 $1400 \leq \lambda < 10^5$ 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 W tabeli określono wartości dla pojedynczych impulsów laserowych. W przypadku wielokrotnych impulsów laserowych, czasy trwania impulsów należących do przedziału T_{min} (wymienione w tabeli 12.) należy dodać, a będącą wynikiem wartość czasu należy podstawić w miejsce t we wzorze: $5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}$.

Tabela 9.

Wartości graniczne ekspozycji oka na promieniowanie laserowe – długi czas trwania ekspozycji ≥ 10 s (dyrektywa 2006/25/WE)

Długość fali ^a , nm		Apertura	Czas trwania, s		
			$10^1 - 10^2$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 3 \cdot 10^4$
UVC	180 - 280	3,5 mm	$H = 30 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 40 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 60 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 100 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 160 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 250 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 400 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 630 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 1,0 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ $H = 10^4 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	280 - 302				
	303				
	304				
	305				
	306				
	307				
	308				
	309				
	310				
	311				
	312				
	313				
	314				
UVA	315 - 400				
Widzialne 400 – 700	400 - 600 Fotochemiczne ^b uszkodzenie siatkówki	7 mm	$H = 100 C_B \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ ($\gamma = 11 \text{ mrad}$) ^d	$E = 1 C_B \text{ [W m}^{-2}\text{]}$; ($\gamma = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad}$) ^d	$E = 1 C_B \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ ($\gamma = 110 \text{ mrad}$) ^d
	400 -700 Termiczne ^b uszkodzenie siatkówki		jeżeli $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$, to $E = 10 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t \leq T_2$, to $H = 18 C_E t^{0,75} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t > T_2$, to $E = 18 C_E T_2^{-0,25} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$		
IRA	700 - 1 400	7 mm	jeżeli $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$, to $E = 10 C_A C_C \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t \leq T_2$, to $H = 18 C_A C_C C_E t^{0,75} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ jeżeli $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ i $t > T_2$, to $E = 18 C_A C_C C_E T_2^{-0,25} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ (maksymalnie 1 000 W m ⁻²)		
IRB i IRC	$1\ 400 - 10^6$	patrz ^c	$E = 1\ 000 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$		

^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 12. Zagrożenie fotochemiczne siatkówki oka może być wyrażone również poprzez zintegrowaną luminancję energetyczną $G = 106 C_B \text{ [J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}\text{]}$ dla $t > 10 \text{ s}$ do $t = 10\ 000 \text{ s}$ oraz poprzez luminancję energetyczną $L = 100 C_B \text{ [W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}\text{]}$ 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 wynosi 780 nm, jak określa CIE. Kolumna zawierająca nazwy zakresów długości fali ma jedynie zapewnić użytkownikowi lepszy ogólny przegląd (symbol G używany jest przez CEN; symbol L_p używany jest przez IEC i CENELEC).

^c Dla długości fali $1400 - 10^5 \text{ nm}$: średnica apertury = 3,5 mm; dla długości fali $10^5 - 10^6 \text{ nm}$: 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 10.**Wartości graniczne ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe (dyrektywa 2006/25/WE)**

Długość fali ^a , nm		Apertura	Czas trwania, s					
			< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ ÷ 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ÷ 10 ⁻³	10 ⁻³ ÷ 10 ¹	10 ¹ ÷ 10 ³	10 ³ ÷ 3 · 10 ⁴
UV (A, B, C)	180-400	3, 5 mm	E = 3 · 10 ¹⁰ [W m ⁻²]	Takie same wartości graniczne jak dla ekspozycji oka				
Wi- dzialne i IRA	400-700		E = 2 · 10 ¹¹ [W m ⁻²]	H=200 C _A [J m ⁻²]	H = 1,1 · 10 ⁴ C _A t ^{0,25} [J m ⁻²]	E = 2 · 10 ³ C _A [W m ⁻²]		
	700 -1400		E = 2 · 10 ¹¹ C _A [W m ⁻²]					
IRB i IRC	1400-1500		E = 10 ¹² [W m ⁻²]	Takie same wartości graniczne jak dla ekspozycji oka				
	1500-1800		E = 10 ¹³ [W m ⁻²]					
	1800-2600		E = 10 ¹² [W m ⁻²]					
	2600-10 ⁶		E = 10 ¹¹ [W m ⁻²]					

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

Tabela 11.

Wartości stosowanych współczynników korekcyjnych i innych parametrów obliczeniowych (dyrektywa 2006/25/WE)

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	$700 \div 1\ 150$	$C_C = 1,0$
	$1\ 150 \div 1\ 200$	$C_C = 10^{0,018(\lambda - 1\ 150)}$
T_1	$1\ 200 \div 1\ 400$	$C_C = 8,0$
	$\lambda < 450$	$T_1 = 10\ \text{s}$
	$450 \div 500$	$T_1 = 10 \cdot [10^{0,02(\lambda - 450)}]\ \text{s}$
	$\lambda > 500$	$T_1 = 100\ \text{s}$
Parametr wg wykazu ICNIRP	obowiązujące 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	$t \leq 100$	$\gamma = 11\ [\text{mrad}]$
	$100 < t < 10^4$	$\gamma = 1,1\ t^{0,5}\ [\text{mrad}]$
	$t > 10^4$	$\gamma = 110\ [\text{mrad}]$

Zestawione w tabeli 11. współczynniki korekcyjne określają zmiany mechanizmów oddziaływania promieniowania laserowego z tkankami w różnych rozpatrywanych przypadkach. Indeksy stosowane przy określaniu wymienionych współczynników pochodzą od następujących angielskich słów określających zakres ich stosowalności:

- C_A – (*retinal absorption correction factor*, współczynnik korekcyjny absorpcji w siatkówce) – współczynnik redukujący wartość MDE w zależności od współczynnika absorpcji promieniowania z zakresu $400 \div 1400\ \text{nm}$ w melaninie znajdującej się w siatkówce,
- C_B – (*blue light correction factor*, współczynnik korekcyjny dla światła niebieskiego) – współczynnik redukujący wartość MDE dla zagrożenia fotochemicznego dla dłuższych fal z zakresu $500 \div 600\ \text{nm}$,
- C_C – (*corneal absorption correction factor*, współczynnik korekcyjny absorpcji w rogówce) – współczynnik zwiększający wartość MDE dla dłuższych fal ze względu na absorpcje w rogówce,

C_E – (*extended sources* – współczynnik korekcyjny źródeł rozciągniętych) – współczynnik zwiększający wartość MDE dla kątów rozbieżności źródła promieniowania większych od 1,5 mrad.

W przypadku laserów impulsowych powinno się zastosować każdy spośród następujących trzech warunków ogólnych (dyrektywa 2006/25/WE):

- 1) ekspozycja na jakikolwiek pojedynczy impuls w obrębie ciągu impulsów nie może przekraczać wartości granicznych ekspozycji dla pojedynczego impulsu o tym czasie trwania,
- 2) ekspozycja na jakikolwiek grupę impulsów (lub podgrupę impulsów w ciągu impulsów) dostarczonych w czasie t nie może przekraczać wartości granicznej ekspozycji dla czasu t ,
- 3) 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 czasu T_{min} , dla którego ciąg impulsów traktowany jest jako pojedynczy impuls, zestawiono w tabelicy 12.

Tabela 12.

Korekta dla ekspozycji powtarzalnych (dyrektywa 2006/25/WE)

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)

Zasięg uszkodzeń spowodowanych ekspozycją na promieniowanie laserowe zależy od długości fali, czasu trwania impulsów laserowych lub czasu ekspozycji, kąta widzenia źródła (dla zakresu 400 ÷ 1400 nm). Wprowadzono zatem odpowiednie współczynniki korekcyjne (C_A , C_B , C_C i C_E) oraz punkty czasowe (T_1 i T_2) wykorzystywane przy wyznaczeniu wartości MDE.

W przypadku wszystkich ekspozycji powtarzalnych określono dla poszczególnych zakresów widmowych wartości częstotliwości granicznej (tab. 13.). Parametrem tym określa się wartość częstotliwości, powyżej której warunek 3. staje się bardziej restrykcyjny. Wartości częstotliwości granicznych nie wynikają z prostego przeliczenia T_{min} na częstotliwość ($1/T_{min}$). Częstotliwości te zostały określone na podstawie analizy restrykcyjności warunków 2. i 3. dla poszczególnych zakresów widmowych promieniowania.

Tabela 13.**Wartości częstotliwości granicznych (Laser Professionals)**

Obowiązujący zakres widmowy, nm	Częstotliwość graniczna
$180 < \lambda \leq 400$	216 Hz
$400 < \lambda \leq 1050$	55 kHz
$1050 < \lambda \leq 1400$	22 kHz
$1400 < \lambda \leq 1500$	2,2 Hz
$1500 < \lambda \leq 1800$	0,1 Hz
$1800 < \lambda \leq 2\ 600$	2,2 Hz
$2\ 600 < \lambda \leq 10^6$	46,5 Hz

Charakterystyka kryteriów oceny zagrożenia na promieniowanie laserowe zawartych w przepisach innych państw

Dyrektywa 2006/25/WE jest dokumentem obowiązującym we wszystkich państwach Unii Europejskiej. Takie państwa, jak USA czy Australia mają własne akty prawne regulujące kryteria zagrożenia promieniowaniem laserowym.

Dokumentem obowiązującym w Stanach Zjednoczonych jest norma ANSI Z136.1 – 2007 „American national standard for safe use of lasers”. Analiza zawartych w nim kryteriów oceny zagrożenia na promieniowanie laserowe wykazuje bardzo wiele podobieństw do kryteriów zawartych w dyrektywie 2006/25/WE.

Wartości MDE (ang. MPE) na promieniowanie laserowe zawarte w dyrektywie oraz w normie ANSI są te same dla całego zakresu długości fal promieniowania optycznego ($180 \div 10^6$ nm). Analogiczny jest także podział tabel zawierających wartości MDE dla skóry oraz oka, przy czym w dyrektywie podzielono tabele ze względu na czas ekspozycji (osobne tabele dla czasów poniżej 10 s oraz powyżej 10 s), a w normie ANSI podziału dokonano ze względu na rozciągłość źródła promieniowania (ekspozycja na promieniowanie źródła punktowego oraz rozciągniętego).

Współczynniki korekcyjne (C_A , C_B , C_C , C_E i C_P), punkty czasowe (T_1 i T_2) oraz kąt odbioru (γ) są identyczne w obu dokumentach i są stosowane w tych samych zakresach spektralnych promieniowania. Oba dokumenty zawierają wartości pomiarowej apertury ograniczającej, przy czym w normie ANSI przewiduje się osobną tabelę z wartościami apertur, natomiast w dyrektywie wartości te znajdują się w tabelach z wartościami MDE, przy czym wartości w obu dokumentach są takie same.

Podsumowując, można stwierdzić, iż kryteria oceny zawarte w dyrektywie 2006/25/WE oraz w normie ANSI Z136.1 – 2007 są prawie identyczne, w szczególności w zakresie: wartości MDE oraz przebiegów zmienności i zakresu stosowalności współczynników korekcyjnych, punktów czasowych oraz kąta odbioru.

PORÓWNANIE KRYTERIÓW OCENY ZAGROŻENIA NA PROMIENIOWANIE LASEROWE W ROZPORZĄDZENIU MINISTRA PRACY I POLITYKI SPOŁECZNEJ Z 2002 R. ORAZ W DYREKTYWIE 2006/25/WE

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 (promieniowaniem optycznym) powstała jako kompilacja kryteriów oceny zagrożeń ustalonych i opublikowanych przez Międzynarodową Komisję ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym ICNIRP i normy IEC 60825-1. Została ona uzupełniona o wartości graniczne ekspozycji oczu dla czasów ekspozycji poniżej 10^{-9} s, co wynika z najnowszego stanu wiedzy związanego z postępem techniki laserowej.

Różnice konstrukcji dokumentów oraz tabel zawierających wartości MDE

Podstawową różnicą między dwoma analizowanymi dokumentami jest zastosowany podział tabel określających wartości MDE dla oka. W obu dokumentach są dwie tabele z wartościami MDE dla ekspozycji oka na promieniowanie laserowe, przy czym zastosowane jest inne kryterium tego podziału. W rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej kryterium podziału jest wielkość źródła promieniowania i znajduje się osobna tabela z wartościami MDE dla oka w przypadku ekspozycji na promieniowanie laserowe źródeł punktowych (patrzenie w wiązkę) oraz osobna dla źródeł rozciągniętych. W dyrektywie kryterium podziału stanowi czas trwania ekspozycji i znajdują się w niej osobne tabele z wartościami MDE dla czasów ekspozycji krótszych oraz dłuższych od 10 s.

W dyrektywie wartości MDE oka nie są rozpatrywane osobno dla źródeł punktowych oraz rozciągniętych. Źródła rozciągnięte zostały uwzględnione przez wprowadzenie odpowiedniego współczynnika korekcyjnego uwzględniającego wielkość źródła (C_E) przy wyznaczaniu wartości MDE.

W dyrektywie zawarto także informacje na temat apertury zastępczego układu optycznego stosowanego do pomiarów parametrów promieniowania laserowego w celu dokonania oceny zagrożenia tym promieniowaniem, co nie zostało uwzględnione w rozporządzeniu.

Różnice między stosowanymi współczynnikami korekcyjnymi do przeliczania wartości MDE

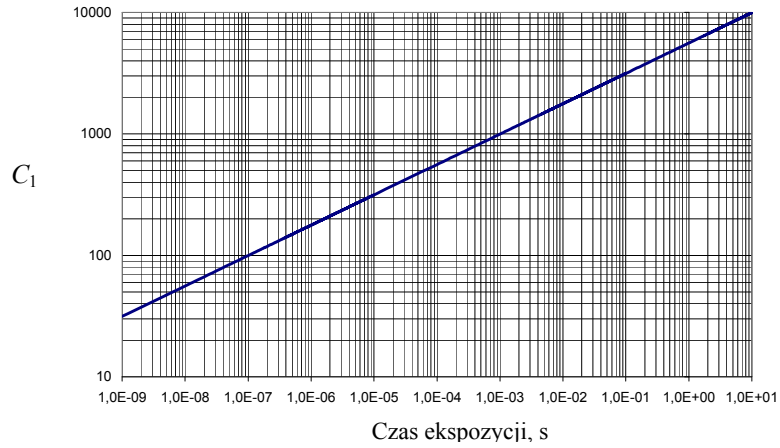
W obu dokumentach przy wyliczaniu wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji jest stosowanych szereg współczynników korekcyjnych oraz punktów czasowych zależnych od: długości fali, czasu ekspozycji czy kąta widzenia źródła promieniowania. Natomiast różne są w obu dokumentach wartości współczynników oraz zakres ich stosowalności.

W rozporządzeniu są stosowane cztery współczynniki korekcyjne oraz dwa punkty czasowe:

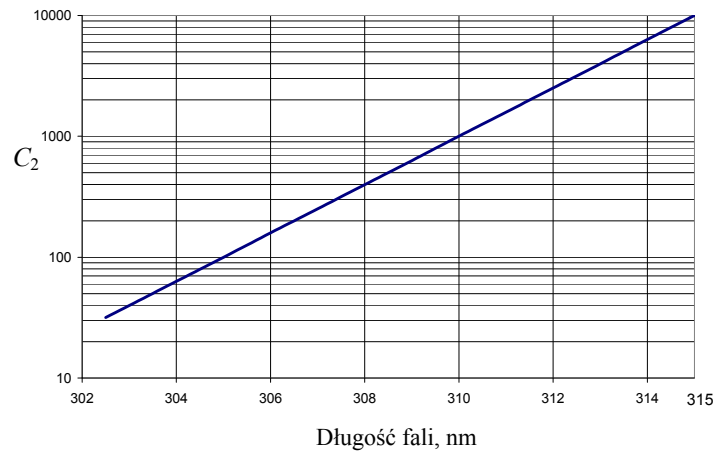
- C_1 zależny od czasu trwania ekspozycji i odnoszący się do zakresu widmowego 302,5 ÷ 400 nm
- C_2 zależny od długości fali i odnoszący się do zakresu widmowego 302,5 ÷ 315 nm
- C_3 zależny od długości fali i odnoszący się do zakresu widmowego 550 ÷ 700 nm
- C_4 zależny od długości fali i odnoszący się do zakresu widmowego 700 ÷ 1050 nm
- T_1 (s) zależny od długości fali i odnoszący się do zakresu widmowego 302,5 ÷ 315 nm
- T_2 (s) zależny od długości fali i odnoszący się do zakresu widmowego 700 ÷ 1050 nm.

W rozporządzeniu jest stosowana dodatkowo wartość granicznego kąta widzenia źródła promieniowania α_{\min} będąca funkcją czasu trwania ekspozycji.

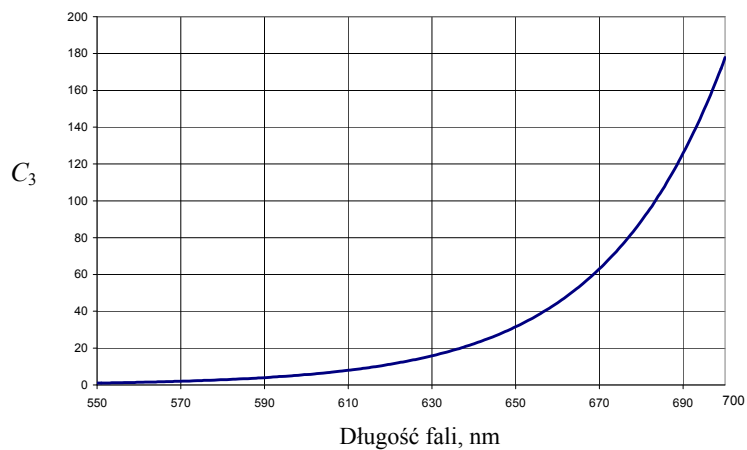
Na rysunkach 30. – 35. przedstawiono wykresy wymienionych współczynników korekcyjnych.



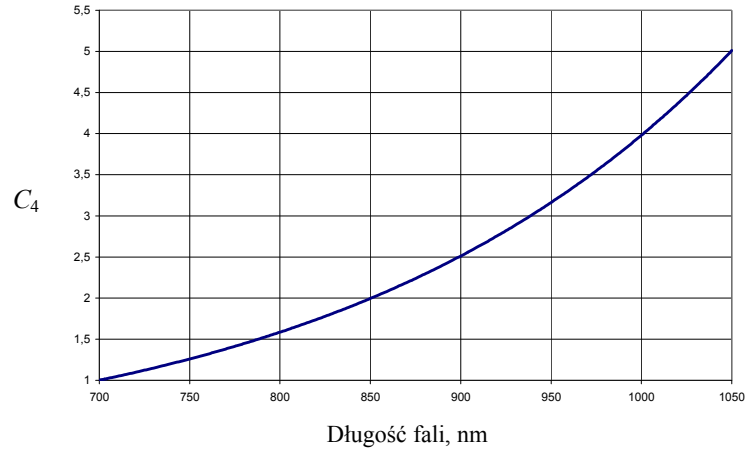
Rys. 30. Zależność współczynnika korekcyjnego C_1 od czasu trwania ekspozycji w zakresie $1 \text{ ns} \div 10 \text{ s}$



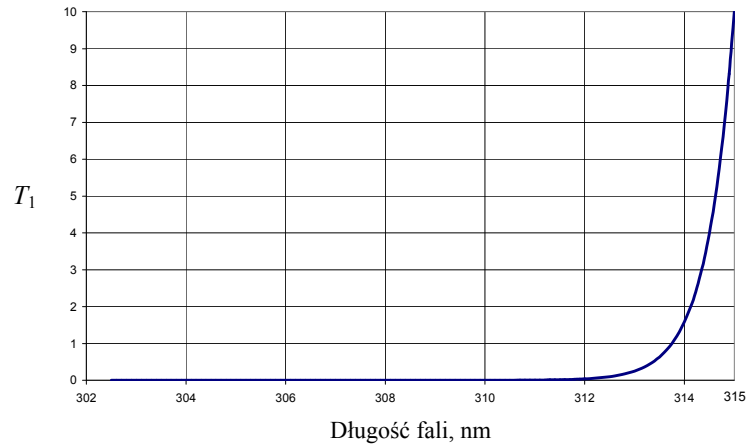
Rys. 31. Zależność współczynnika korekcyjnego C_2 od długości fali w zakresie $302 \div 315 \text{ nm}$



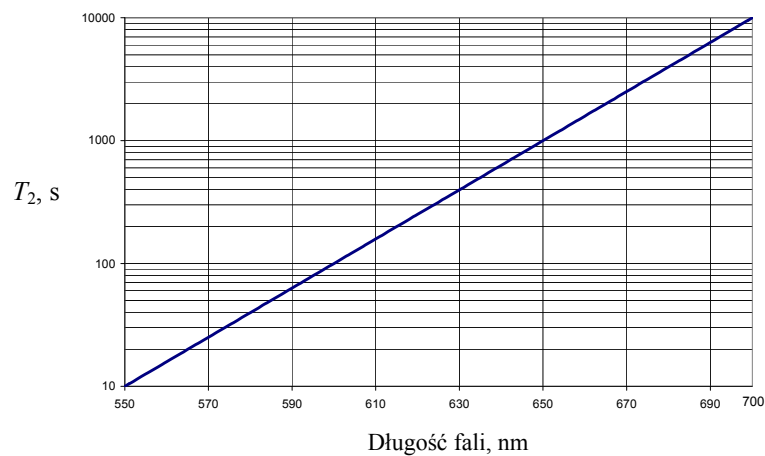
Rys. 32. Zależność współczynnika korekcyjnego C_3 od długości fali w zakresie $550 \div 700 \text{ nm}$



Rys. 33. Zależność współczynnika korekcyjnego C_4 od długości fali w zakresie 700 ÷ 1050 nm



Rys. 34. Zależność współczynnika korekcyjnego T_1 od długości fali w zakresie 302 ÷ 315 nm

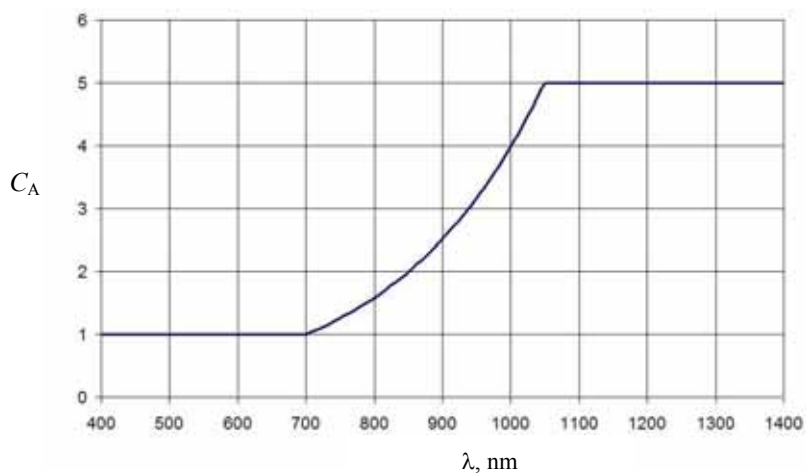


Rys. 35. Zależność współczynnika korekcyjnego T_2 od długości fali w zakresie 550 ÷ 700 nm

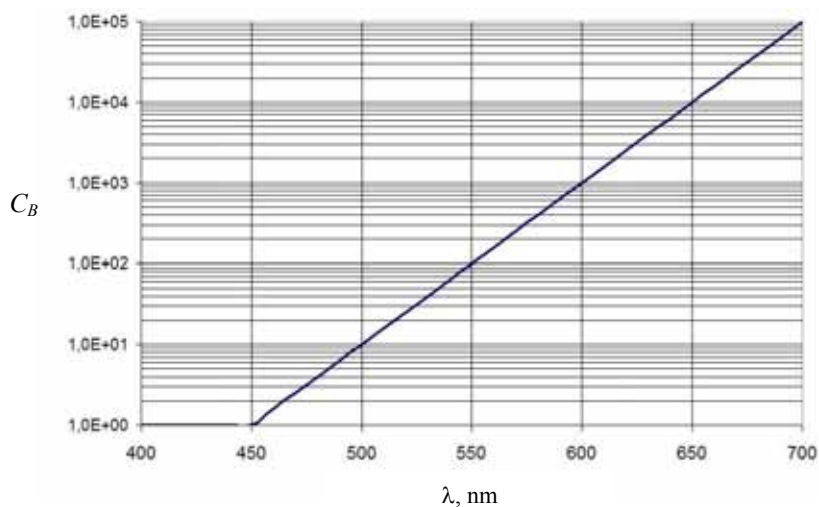
W dyrektywie i w rozporządzeniu są stosowane cztery współczynniki korekcyjne oraz dwa punkty czasowe :

- C_A zależny od długości fali, odnoszący się do zakresu widmowego 700 ÷ 1400 nm
- C_B zależny od długości fali, odnoszący się do zakresu widmowego 400 ÷ 700 nm
- C_C zależny od długości fali, odnoszący się do zakresu widmowego 700 ÷ 1400 nm
- C_E zależny od kąta widzenia źródła promieniowania, odnoszący się do zakresu kątów 1,5 ÷ 100 mrad
- T_1 (s) zależny od długości fali, odnoszący się do zakresu widmowego 450 ÷ 500 nm
- T_2 (s) zależny od kąta widzenia źródła promieniowania, odnoszący się do zakresu kątów 1,5 ÷ 100 mrad
- kąt γ , wierzchołkowy kąt stożka ograniczającego pomiarowe pole widzenia γ wyrażony w mrad, zależny od czasu ekspozycji, odnoszący się do zakresu czasów ekspozycji 100 ÷ 10⁴ s. Stosowany jest w zakresie 400 ÷ 600 nm przy ocenie zagrożenia fotochemicznego.

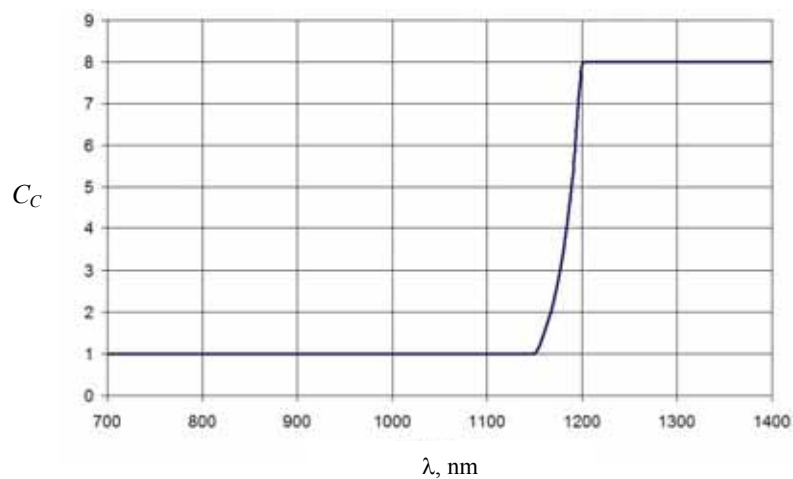
Na rysunkach 36. – 42. przedstawiono wykresy analizowanych współczynników korekcyjnych.



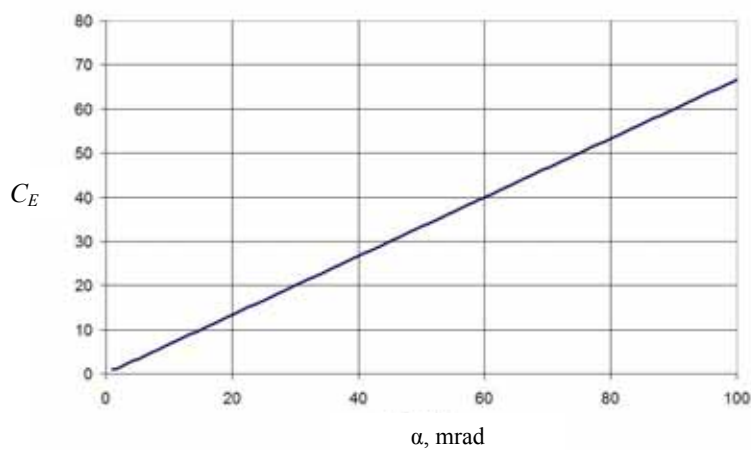
Rys. 36. Zależność współczynnika korekcyjnego C_A od długości fali w zakresie 400 ÷ 1400 nm



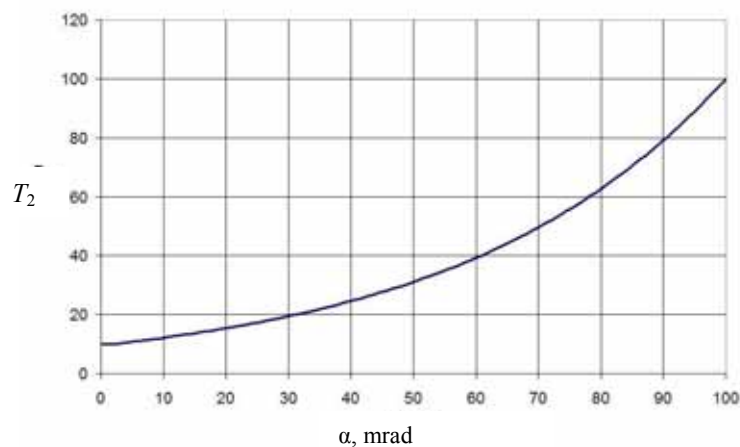
Rys. 37. Zależność współczynnika korekcyjnego C_B od długości fali w zakresie 400 ÷ 700 nm



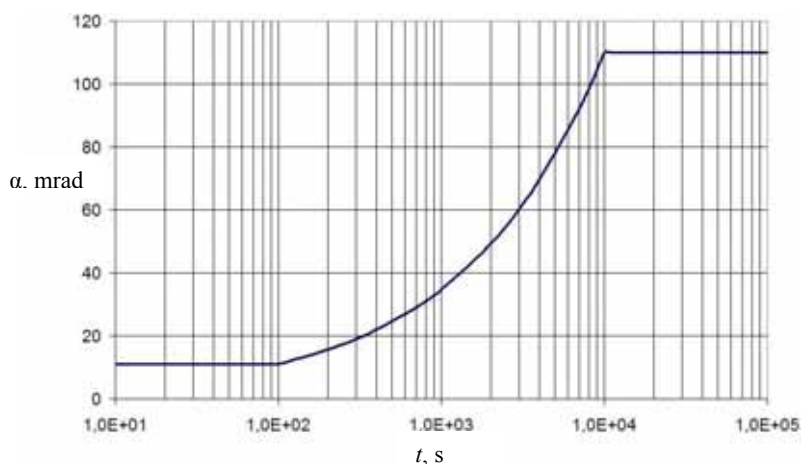
Rys. 38. Zależność współczynnika korekcyjnego C_C od długości fali w zakresie $700 \div 1400$ nm



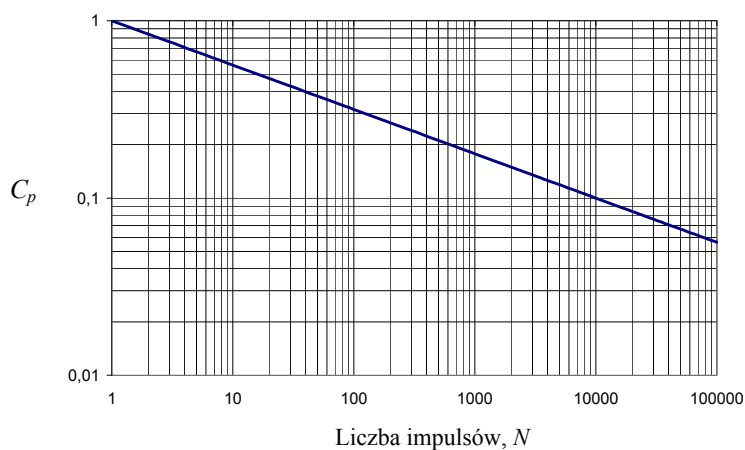
Rys. 39. Zależność współczynnika korekcyjnego C_E od kąta widzenia źródła promieniowania w zakresie $0 \div 100$ mrad



Rys. 40. Zależność współczynnika korekcyjnego T_2 od kąta widzenia źródła promieniowania w zakresie $0 \div 100$ mrad



Rys. 41. Zależność współczynnika korekcyjnego γ od czasu trwania ekspozycji w zakresie $10 \div 10\,000$ s



Rys. 42. Zależność współczynnika korekcyjnego γ od liczby impulsów w zakresie $1 \div 100\,000$ impulsów

W tabeli 14. zestawiono wszystkie występujące w obu dokumentach współczynniki korekcyjne oraz punkty czasowe stosowane do przeliczania wartości MDE. W nawiasach przy poszczególnych współczynnikach korekcyjnych podano parametry, od których one zależą.

Tabela 14.

Zestawienie współczynników korekcyjnych oraz punktów czasowych stosowanych w rozporządzeniu z 2002 r. oraz w dyrektywie 2006/25/WE

Zakres długości fali, nm	Współczynniki korekcyjne oraz punkty czasowe			
	w rozporządzeniu		w dyrektywie	
302,5 ÷ 315	$C_1(\lambda)$	$T_1(\lambda)$	–	–
315 ÷ 400	$C_2(\lambda)$	–	–	–
400 ÷ 500	–	–	$C_B(\lambda), C_E(\lambda), \gamma(\lambda)$	$T_1(\lambda), T_2(\alpha)$
500 ÷ 550	–	–	$C_B(\lambda), C_E(\lambda), \gamma(\lambda)$	$T_1(\lambda), T_2(\alpha)$
550 ÷ 600	$C_3(\lambda)$	–	$C_B(\lambda), C_E(\lambda), \gamma(\lambda)$	$T_1(\lambda), T_2(\alpha)$
600 ÷ 700	$C_3(\lambda)$	–	$C_B(\lambda), C_E(\lambda)$	$T_2(\alpha)$
700 ÷ 1050	$C_4(\lambda)$	$T_2(\lambda)$	$C_A(\lambda), C_E(\alpha), C_C(\lambda)$	$T_2(\alpha)$
1050 ÷ 1400	–	–	$C_A(\lambda), C_E(\alpha), C_C(\lambda)$	$T_2(\alpha)$

Na podstawie analizy danych zawartych w tabeli 14. oraz wykresów przedstawionych na rysunkach 30. – 42. można stwierdzić, iż rozpatrywane współczynniki różnią się znacząco pod względem zakresu widmowego ich stosowania i wartości liczbowych.

Współczynniki korekcyjne zawarte w dyrektywie są stosowane dla zakresu promieniowania laserowego powyżej 400 nm, w rozporządzeniu natomiast przewiduje się stosowanie współczynników jedynie w określonych zakresach widma (302,5 ÷ 400 nm oraz 550 ÷ 1050 nm).

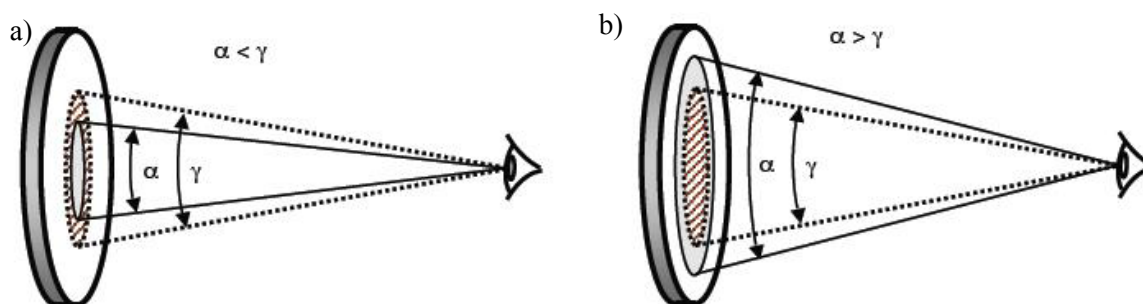
Współczynniki przewidziane w rozporządzeniu są zależne jedynie od długości fali, podczas gdy współczynniki podane w dyrektywie są zależne zarówno od długości fali, jak również od kąta widzenia źródła promieniowania.

Na podstawie rysunku 33. i 36. można stwierdzić taki sam przebieg zmienności współczynników C_4 (rozporządzenie) oraz C_A (dyrektywa) w zakresie widma 700 ÷ 1050 nm. Współczynnik C_4 jest stosowany do długości fali 1050 nm, natomiast C_C do długości fali 1400 nm.

W dyrektywie są stosowane dwa kąty związane z ekspozycją oka na promieniowanie laserowe:

- kąt widzenia źródła promieniowania oznaczony jako α ,
- wierzchołkowy kąt stożka ograniczającego pomiarowe pole widzenia γ .

Zależność między wymienionymi kątami przedstawiono na rysunku 43., wówczas gdy $\alpha < \gamma$ oraz $\alpha > \gamma$.



Rys. 43. Ilustracja kąta widzenia źródła promieniowania α oraz wierzchołkowego kąta stożka ograniczającego pomiarowe pole widzenia γ , a) gdy $\alpha < \gamma$, b) gdy $\alpha > \gamma$

Podczas pomiaru parametrów promieniowania laserowego uwzględnienie kąta γ określono w następujący sposób (dyrektywa 2006/25/WE):

- jeżeli $\alpha > \gamma$, wówczas pomiarowe pole widzenia γ_m powinno przyjmować wartość γ (przy zastosowaniu większego pomiarowego pola widzenia zagrożenie byłoby przeszacowane)
- jeżeli $\alpha < \gamma$, wówczas 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 .

Różnice przyjętych granicznych zakresów czasu trwania ekspozycji

W dyrektywie 2006/25/WE i w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. przyjęto różne granice zakresów czasu trwania ekspozycji, dla których są określone odpowiednio wartości graniczne ekspozycji oczu na promieniowanie laserowe. Różnice te są następujące:

- dla ekspozycji oczu poniżej 10^{-9} s w rozporządzeniu podano jeden przedział czasowy, dla którego określono wartości MDE, podczas gdy w dyrektywie ten sam przedział czasowy podzielono na dwa podzakresy: 10^{-13} do 10^{-11} s oraz 10^{-11} do 10^{-9} s

- dla ekspozycji oczu w przedziale 10^{-7} do $1,8 \cdot 10^{-5}$ s w dyrektywie występuje jeden zakres czasowy, dla którego określono wartości graniczne, podczas gdy w rozporządzeniu ten przedział czasowy podzielono na dwa podzakresy: 10^{-7} do 10^{-6} s oraz 10^{-6} do $1,8 \cdot 10^{-5}$ s
- dla ekspozycji oczu w przedziale $5 \cdot 10^{-5}$ do 10 s w rozporządzeniu występuje jeden zakres czasowy, dla którego określono wartości MDE, podczas gdy w dyrektywie ten przedział czasowy podzielono na dwa podzakresy $5 \cdot 10^{-5}$ do 10^{-3} s oraz 10^{-3} do 10 s
- przedział czasowy ekspozycji oczu w zakresie 10 do 10^4 s został w obu dokumentach podzielony na dwa różne podzakresy. W dyrektywie podzielono go na podzakresy: 10 do 10^2 s i 10^2 do 10^4 s, podczas gdy w rozporządzeniu są to podzakresy: 10 do 10^3 s i 10^3 do 10^4 s.

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

W przypadku wartości granicznych ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe w obu dokumentach nie ma różnicy pod względem przyjętych granic zakresów czasu ekspozycji.

Różnice przyjętych granicznych zakresów długości fal promieniowania laserowego

W przyjętym w obu analizowanych dokumentach podziale granic zakresów długości fali promieniowania laserowego, dla których określono wartości graniczne ekspozycji, można zauważyć dość znaczne różnice. W dyrektywie występuje odrębne przypisanie wartości granicznych ekspozycji oka poszczególnym długościom fali z zakresu $303 \div 314$ nm (podanych z dokładnością do 1 nm), podczas, gdy w rozporządzeniu występuje jedna wartość MDE dla całego zakresu długości fal $302,5 \div 315$ nm.

W obu dokumentach jest inny podział zakresów długości fal, dla których określono wartości MDE. Zakresy, w których występują różnice wartości MDE, przedstawiono w tabeli 15.

Tabela 15.

Różnice podziału zakresów długości fal, dla których są określone wartości MDE w dyrektywie 2006/25/WE i w rozporządzeniu z 2002 r.

Zakresy długości fal w dyrektywie	Zakresy długości fal w rozporządzeniu
Oko	
180 ÷ 280 nm	180 ÷ 302,5 nm
280 ÷ 302 nm	302,5 ÷ 315 nm
302 ÷ 314 nm	315 ÷ 400 nm
315 ÷ 400 nm	400 ÷ 550 nm
400 ÷ 700 nm (400 ÷ 600 nm) ^a	550 ÷ 700 nm
700 ÷ 1050 nm	700 ÷ 1050 nm
1050 ÷ 1400 nm	1050 ÷ 1400 nm
1400 ÷ 1500 nm	1400 ÷ 1530 nm
1500 ÷ 1800 nm	1530 ÷ 1550 nm
1800 ÷ 2600 nm	1550 nm ÷ 1 mm
2600 nm ÷ 1 mm	

cd. tab. 15.

Zakresy długości fal w dyrektywie	Zakresy długości fal w rozporządzeniu
Skóra	
180 ÷ 400 nm	
400 ÷ 700 nm	180 ÷ 302,5 nm
700 ÷ 1400 nm	302,5 ÷ 315 nm
1400 ÷ 1500 nm	315 ÷ 400 nm
1500 ÷ 1800 nm	400 ÷ 1400 nm
1800 ÷ 2600 nm	1400 nm ÷ 1 mm
2600 nm ÷ 1 mm	

^a Zagrożenie fotochemiczne dla ekspozycji powyżej 10 s.

RÓŻNICE WARTOŚCI MAKSYMALNYCH DOPUSZCZALNYCH EKSPOZYCJI (MDE) ZAWARTYCH W ROZPORZĄDZENIU Z 2002 R. ORAZ W DYREKTYWIE 2006/25/WE

Wstępne porównanie tablic z wartościami maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) w obu dokumentach wskazało na ich znaczne zróżnicowanie. Dla tych samych zakresów czasowych i widmowych występowały :

- wartości MDE określone za pomocą tych samych parametrów
- wartości MDE określone za pomocą różnych parametrów (napromienienie i natężenie napromienienia lub luminancja energetyczna).

W wielu więc wypadkach, gdy wartości MDE były określone za pomocą różnych parametrów, konieczne było ich przeliczanie. Przyjęto następujące zasady przeliczania wartości MDE:

- dla źródeł punktowych oraz ekspozycji skóry napromienienie przeliczano na natężenie napromienienia (zgodnie ze wzorem 1. zamieszczonym w rozdziale: Zakres promieniowania widzialnego (VIS) oraz bliskiej podczerwieni IR–A
- dla źródeł rozciągłych napromienienie na luminancję energetyczną lub natężenie napromienienia na zintegrowaną luminancję energetyczną (zgodnie ze wzorami 2., 3. i 4.).

Na podstawie porównania kryteriów zawartych w obu dokumentach stwierdzono, iż współczynniki korekcyjne dla serii impulsów są w obu dokumentach takie same. W związku z tym, wówczas gdy w jednym z dokumentów kryteria dla pojedynczego impulsu były ostrzejsze w porównaniu z drugim dokumentem, to dla serii impulsów też będą one bardziej restrykcyjne.

Zakres promieniowania nadfioletowego (UV) – zagrożenie oczu oraz skóry

Promieniowanie UV w obu rozpatrywanych dokumentach (w rozporządzeniu oraz w dyrektywie) przypada na zakres długości fal 180 ÷ 400 nm. Wartości MDE dla zagrożenia skóry są w tych dokumentach identyczne jak dla zagrożenia oczu, zatem analiza porównawcza została przeprowadzona dla całego zakresu fal bez podziału na oko oraz skórę.

W zakresie spektralnym 180 ÷ 302 nm zarówno w rozporządzeniu (przypadek patrzenia w wiązkę dla źródeł rozciągłych oraz dla skóry), jak również w dyrektywie wartość maksymalnej

dopuszczalnej ekspozycji oka oraz skóry jest taka sama i wynosi $E = 3 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$ dla czasów trwania impulsów $< 10^{-9}$ oraz $H = 30 \text{ J/m}^2$ dla czasów ekspozycji z zakresu $1 \text{ ns} \div 10^4 \text{ s}$. Podobnie w zakresie spektralnym $315 \div 400 \text{ nm}$ zarówno dla skóry, jak również dla oka wartości MDE są identyczne w obu dokumentach.

W zakresie długości fal $303 \div 314 \text{ nm}$ w rozporządzeniu przewidziano dwie wartości MDE, w zależności od tego czy czas ekspozycji odnosi się do pojedynczego impulsu, czy do grupy impulsów. W przypadku zagrożenia grupą impulsów w obrębie czasu ekspozycji wartości MDE w rozporządzeniu oraz w dyrektywie mają identyczne wartości.

Różnice pojawiają się w przypadku wartości MDE dla pojedynczego impulsu, nieznaczne różnice występują także w wartościach czasów ekspozycji, powyżej których zakłada się występowanie grupy impulsów. Różnice te wynikają z faktu, iż w rozporządzeniu do obliczenia wartości MDE wykorzystuje się współczynnik korekcyjny C_1 określony w tabeli 5., podczas gdy w dyrektywie wartości liczbowe są stałe. W tabeli 16. zostały zestawione wartości MDE oraz wartości czasów charakterystycznych dla dyrektywy (t^*) oraz rozporządzenia (T_1).

Tabela 16.

Zestawienie wartości czasów charakterystycznych oraz wartości MDE znajdujących się w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu z 2002 r. dla zakresu spektralnego $302,5 \div 314 \text{ nm}$

Zakres długości fali, nm	W rozporządzeniu		W dyrektywie		Dokument bardziej restrykcyjny
	$T_1, \text{ s}$	MDE, J/m^2	czas $t^a, \text{ s}$	MDE, J/m^2	
302,5	$1,00 \cdot 10^{-9}$	31,62	niewyróżnione	niewyróżnione	—
303	$2,51 \cdot 10^{-9}$	39,81	$2,60 \cdot 10^{-9}$	40	rozporządzenie
304	$1,58 \cdot 10^{-8}$	63,10	$1,30 \cdot 10^{-8}$	60	dyrektywa
305	$1,00 \cdot 10^{-7}$	100	$1,00 \cdot 10^{-7}$	100	równoważne
306	$6,31 \cdot 10^{-7}$	158,49	$6,70 \cdot 10^{-7}$	160	rozporządzenie
307	$3,98 \cdot 10^{-6}$	251,19	$4,00 \cdot 10^{-6}$	250	dyrektywa
308	$2,51 \cdot 10^{-5}$	398,11	$2,60 \cdot 10^{-5}$	400	rozporządzenie
309	$1,58 \cdot 10^{-4}$	630,96	$1,60 \cdot 10^{-4}$	630	dyrektywa
310	$1,00 \cdot 10^{-3}$	1000	$1,00 \cdot 10^{-3}$	1000	równoważne
311	$6,31 \cdot 10^{-3}$	1584,89	$6,70 \cdot 10^{-3}$	1600	rozporządzenie
312	$3,98 \cdot 10^{-2}$	2511,89	$4,00 \cdot 10^{-2}$	2500	dyrektywa
313	$2,51 \cdot 10^{-1}$	3981,07	$2,60 \cdot 10^{-1}$	4000	rozporządzenie
314	1,58	6309,57	1,60	6300	dyrektywa

t^a – czas, powyżej którego założono w dyrektywie występowanie grupy impulsów.

Wartości MDE w rozpatrywanym zakresie $302,5 \div 314 \text{ nm}$ różnią się od siebie bardzo nieznacznie, a stwierdzone różnice wynikają jedynie z przyjętych w dyrektywie matematycznych zaokrągleń wartości MDE.

Zakres promieniowania widzialnego (VIS) oraz bliskiej podczerwieni IR–A

Obydwa rozpatrywane dokumenty łączą zagrożenia związane z promieniowaniem z zakresu widzialnego oraz bliskiej podczerwieni, dlatego analiza tych dwóch zakresów została przeprowadzona łącznie.

Promieniowanie widzialne (VIS) oraz promieniowanie bliskiej podczerwieni (IR-A) w rozporządzeniu oraz w dyrektywie dotyczą zakresu długości fal 400 ÷ 1400 nm.

W rozporządzeniu zostały wyodrębnione osobne tabele dotyczące ekspozycji oka na promieniowanie źródeł punktowych (patrzenie w wiązkę) oraz źródeł rozciąglých. W dyrektywie natomiast nie ma jasnego podziału na źródła punktowe oraz rozciąglę. Źródła rozciąglę są w niej uwzględnione przez wprowadzenie współczynnika korekcyjnego C_E , zależnego od kąta widzenia źródła. Analiza porównawcza wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji została przeprowadzona osobno dla źródeł punktowych oraz źródeł rozciąglých.

W przypadku gdy w jednym z dokumentów wartości MDE były wyrażone w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2), natomiast w drugim w watach na metr kwadratowy (W/m^2), to w celu porównania wartości MDE wyrażonych w dżulach na metr kwadratowy przeliczono na waty na metr kwadratowy, zgodnie ze wzorem 1. przy czym warunek maksymalnego napromienienia został zachowany:

$$E \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{H \left[\frac{J}{m^2} \right]}{t_{eks} [s]} \quad [1]$$

gdzie:

- E – natężenie napromienienia, wat na metr kwadratowy,
- H – napromienienie, dżul na metr kwadratowy,
- t_{eks} – czas trwania ekspozycji.

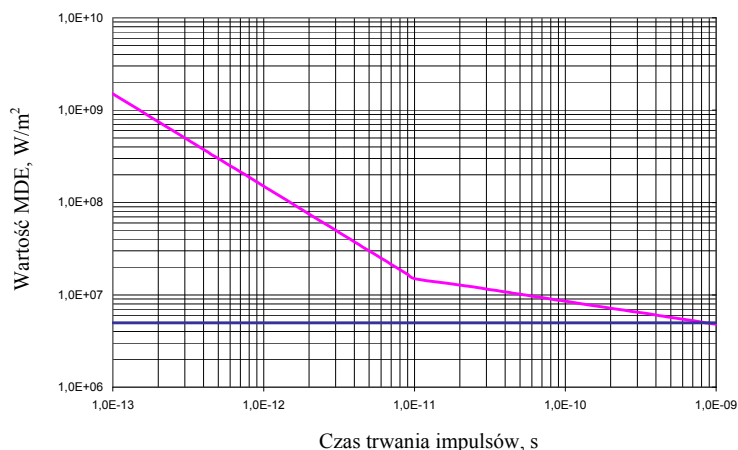
Maksymalne dopuszczalne ekspozycje oka na promieniowanie źródeł punktowych (patrzenie bezpośrednio w wiązkę)

Wartości MDE w rozpatrywanym zakresie w obu dokumentach są bardzo zróżnicowane zarówno ze względu na długości fali, jak również czasy ekspozycji. Przy analizie porównawczej zakres ten został podzielony ze względu na: długość fali, rodzaj zagrożenia oraz czas trwania ekspozycji.

Zagrożenie termiczne – zakres 400 ÷ 700 nm

Zgodnie z dyrektywą dla małych źródeł, których kąt widzenia wynosi co najwyżej 1,5 mrad, podwójne wartości graniczne ekspozycji E 400 ÷ 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 czasów dłuższych. Oznacza to, że dla czasów poniżej 10 s rozpatruje się jedynie termiczne zagrożenie siatkówki, natomiast nie rozpatruje się zagrożenia fotochemicznego.

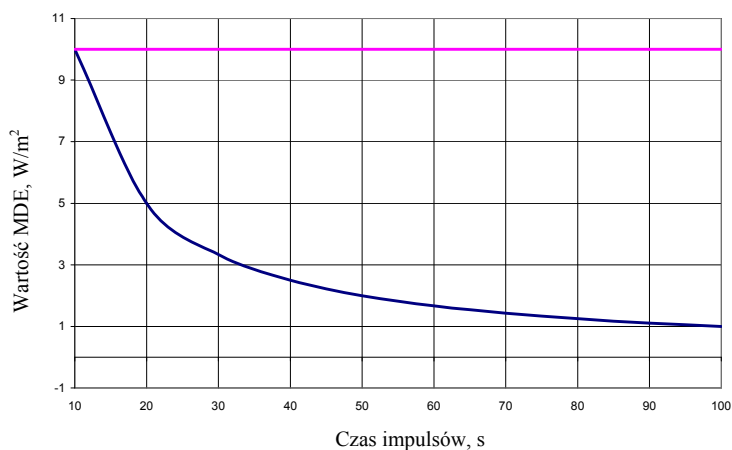
W zakresie długości fal 400 ÷ 700 nm dla czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} w rozporządzeniu przewidziano jedną wartość MDE równą $5 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$, w dyrektywie natomiast są wartości wyrażone w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2) zależnie od czasu trwania impulsów. Różnice pomiędzy wartościami MDE w analizowanych dokumentach przedstawiono na rysunku 44.



Rys. 44. Wartość MDE dla zagrożenia termicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów trwania impulsów z zakresu 0,1 ps ÷ 1 ns w zakresie spektralnym 400 ÷ 700 nm (kolor różowy odpowiada wartościom w dyrektywie, a kolor granatowy w rozporządzeniu)

W zakresie długości fal 400 ÷ 700 nm dla czasów trwania ekspozycji 1 ns ÷ 10 s wartości MDE w obu dokumentach się pokrywają.

Zgodnie z dyrektywą zagrożenie termiczne w zakresie spektralnym 400 ÷ 600 nm dla małych kątów widzenia źródła rozpatruje się jedynie dla czasów do 100 s. Jednocześnie dla długości fal powyżej 600 nm zagrożenie termiczne rozpatruje się także dla dłuższego czasu ekspozycji. Na rysunku 45. przedstawiono przebieg zmienności wartości MDE przewidzianych w rozporządzeniu oraz w dyrektywie w obrębie czasu 10 ÷ 100 s dla zakresu spektralnego 400 ÷ 550 nm. Zgodnie z analizą, której wyniki przedstawiono na wykresie, można stwierdzić, że dla zakresu czasów ekspozycji 10 ÷ 100 s i długości fal 400 ÷ 550 nm wartości MDE w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.



Rys. 45. Wartość MDE dla zagrożenia termicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów ekspozycji 10 ÷ 100 s w zakresie spektralnym 400 ÷ 550 nm (kolor różowy odpowiada wartościom w dyrektywie, a kolor granatowy w rozporządzeniu)

W zakresie spektralnym 550 ÷ 700 nm w rozporządzeniu jest stosowany warunek co do czasu ekspozycji $t > T_2$ i w zależności od spełniania tego warunku stosuje się różne wzory określające wartości MDE. Na podstawie obliczeń stwierdzono, iż niezależnie od spełnienia powyższego warunku wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są zawsze mniejsze od wartości przewidzianych w dyrektywie, co czyni rozporządzenie dokumentem bardziej restrykcyjnym.

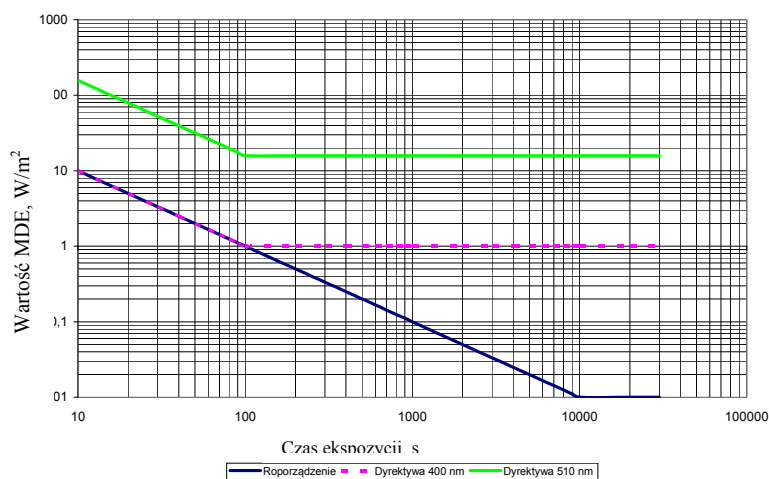
Zagrożenie fotochemiczne – zakres 400 ÷ 600 nm

Dla ekspozycji powyżej 10 s w dyrektywie przewidziano odrębne wartości MDE w przypadku zagrożenia fotochemicznego (zakres 400 ÷ 600 nm) i termicznego (zakres 400 ÷ 700 nm) siatkówki. Poniżej przedstawiono analizę porównawczą wartości MDE w przypadku fotochemicznego zagrożenia.

Zagrożenie fotochemiczne siatkówki oka może być wyrażone również przez zintegrowaną luminancję energetyczną $G = 10^6 C_B$ ($J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) dla $t > 10$ s do $t = 10\,000$ s oraz przez luminancję energetyczną $L = 100 C_B$ ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) dla $t > 10\,000$ s.

Gdy czas ekspozycji wynosił powyżej 10 s w rozporządzeniu podzielono rozpatrywany zakres spektralny na dwa podzakresy 400 ÷ 550 nm oraz 550 ÷ 700 nm. W zakresie 400 ÷ 550 nm wyróżniono dwie wartości MDE wynoszące $100 J/m^2$, gdy czas ekspozycji wynosi $10 \div 10^4$ s oraz $10^{-2} W/m^2$ dla czasów ekspozycji $10^4 \div 3 \cdot 10^4$ s. W tym samym zakresie w dyrektywie przewidziano zmienność wartości MDE dla zagrożenia fotochemicznego wraz ze wzrostem długości fali.

Na rysunku 46. przedstawiono przebieg zmian wartości MDE w zakresie spektralnym 400 ÷ 550 nm dla czasów ekspozycji $10 \div 10^3$ s.



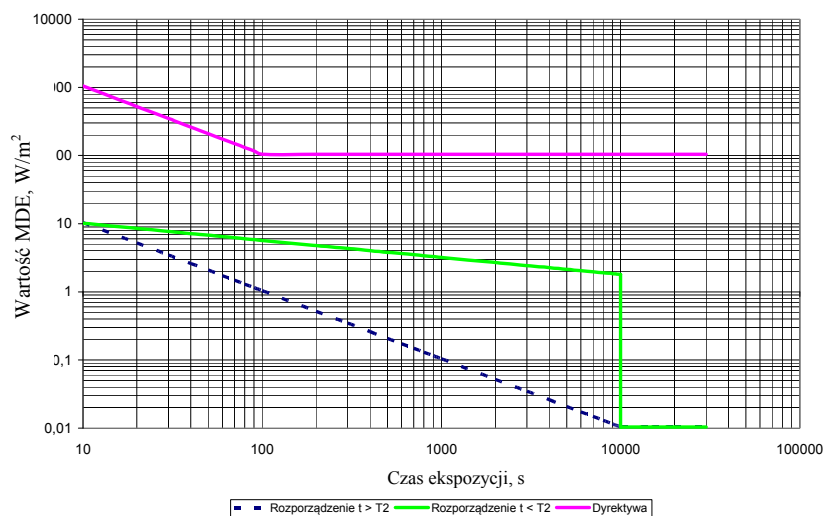
Rys. 46. Wartości MDE dla zagrożenia fotochemicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów ekspozycji $10 \div 10^3$ s w zakresie spektralnym 400 ÷ 550 nm

Ze względu na fakt, iż wartość natężenia napromienienia określona w dyrektywie zależy od długości fali, na wykresie przedstawiono przebiegi dla wybranych dwóch długości fal promieniowania (400 oraz 510 nm), co pozwoliło wykazać, iż w całym zakresie długości fal 400 ÷ 550 nm wartości przewidziane w rozporządzeniu są równe lub mniejsze (bardziej restrykcyjne) od wartości zawartych w dyrektywie.

Korzystając z wyników analizy przedstawionych na rysunku 46., można stwierdzić, że dla długości fali 400 nm i czasów ekspozycji z zakresu $10 \div 100$ s wartości MDE w rozporządzeniu oraz w dyrektywie się pokrywają, natomiast w pozostałych przypadkach analizowanego zakresu wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są mniejsze (bardziej restrykcyjne) od wartości zawartych w dyrektywie.

W zakresie długości fal 550 ÷ 600 nm w rozporządzeniu nałożono dodatkowy warunek na czas ekspozycji związany z punktem czasowym T_2 (T_2 przyjmuje stałą wartość w zależności od długości fali), co było przedstawione na rysunku 40. Wartości MDE są różne wówczas, gdy czas ekspozycji jest większy ($t > T_2$) lub mniejszy ($t < T_2$) od czasu zdefiniowanego jako punkt czasowy

T_2 . Na rysunku 47. przedstawiono wykres ilustrujący porównanie wartości MDE w rozporządzeniu (dla dwóch przypadków, gdy $t > T_2$ i $t < T_2$) oraz w dyrektywie.



Rys. 47. Wartość MDE podczas zagrożenia fotochemicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów trwania ekspozycji $10 \div 3 \cdot 10^4$ s w zakresie spektralnym $550 \div 600$ nm (długość fali 551 nm)

Na podstawie wykresu na rysunku 47. można stwierdzić, iż niezależnie od: długości fali, czasów ekspozycji, a także spełnienia warunku $t > T_2$, wartości MDE zawarte w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne od wartości zawartych w dyrektywie.

W tabelach 17. i 18. zestawiono wyniki analizy restrykcyjności wartości MDE w przypadku zagrożenia termicznego oraz fotochemicznego oka. Zgodnie z wynikami przeprowadzonej analizy można stwierdzić, iż w rozpatrywanym zakresie spektralnym w większości przypadków wartości MDE w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne niż w dyrektywie.

Tabela 17.

Porównanie restrykcyjności wartości MDE dla oka zawartych w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu z 2002 r. w zakresie długości fali $400 \div 700$ nm w przypadku termicznego zagrożenia

Zakres długości fali, nm	Czas ekspozycji, s			
	$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10$	$10 \div 100$	$100 \div 3 \cdot 10^4$
400	rozporządzenie	równoważne	równoważne	—
400 ÷ 550	rozporządzenie	równoważne	rozporządzenie	—
550 ÷ 600	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie	—
600 ÷ 700	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie

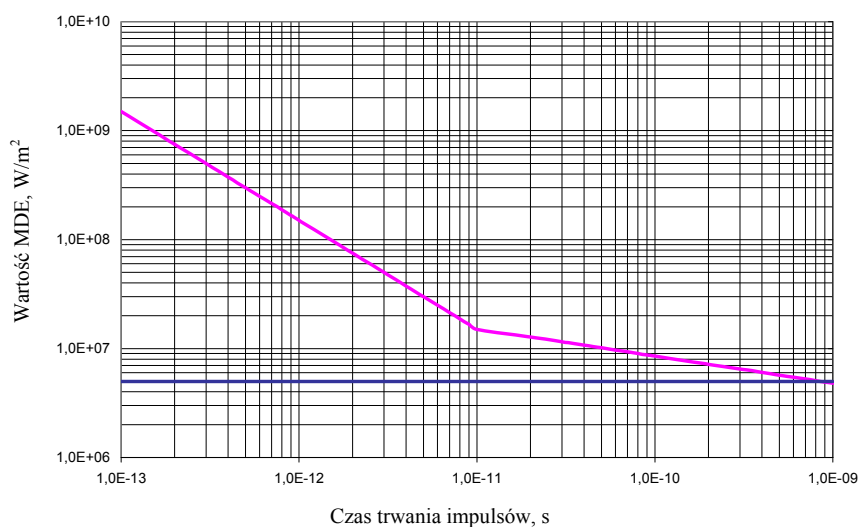
Tabela 18.

Porównanie restrykcyjności wartości MDE dla oka zawartych w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu z 2002 r. w zakresie długości fali $400 \div 600$ nm w przypadku fotochemicznego zagrożenia

Zakres długości fali, nm	Czas ekspozycji, s	
	$10 \div 100$	$100 \div 3 \cdot 10^4$
400	równoważne	rozporządzenie
400 ÷ 550	rozporządzenie	rozporządzenie
550 ÷ 600	rozporządzenie	rozporządzenie

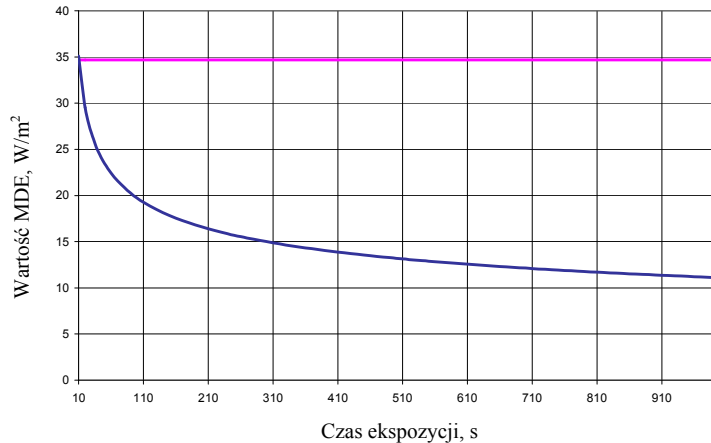
Zagrożenie termiczne – zakres 700 ÷ 1050 nm

W zakresie 700 ÷ 1050 nm i czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} w rozporządzeniu przewidziano wartość MDE wyrażoną w watach na metr kwadratowy (W/m^2) zależną od współczynnika C_4 , który jest funkcją długości fali (rys. 33.). W dyrektywie natomiast wartości wyrażone są w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2), a tym samym wartość natężenia napromienienia jest zależna od czasu trwania impulsów. Dodatkowo przez wprowadzenie współczynnika korekcyjnego C_A wartości MDE zależą także od długości fali. W rozpatrywanym zakresie spektralnym (700 ÷ 1050 nm) odpowiednie wartości współczynników C_4 oraz C_A są równe (opisane jednakowymi wzorami), dlatego też analiza kryteriów w tym zakresie została przeprowadzona jedynie w funkcji czasu trwania impulsów. Różnice w wartościach MDE zawartych w obydwu dokumentach będą zatem wynikały jedynie z faktu, iż w rozporządzeniu przewidziano dopuszczalną wartość natężenia napromienienia, natomiast w dyrektywie – dopuszczalne napromienienie.



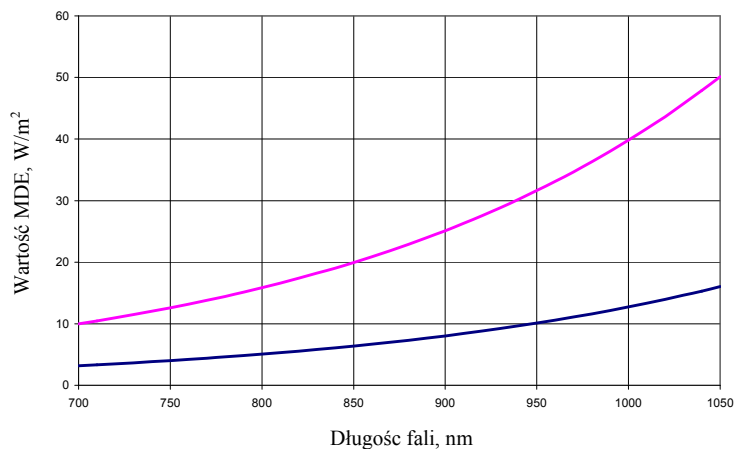
Rys. 48. Wartość MDE w przypadku termicznego zagrożenia oka podczas patrzenia bezpośrednio w wiązkę, gdy czas trwania impulsów wynosi z zakresu 0,1 ps ÷ 1 ns dla zakresu spektralnego 700 ÷ 1050 nm (kolorem różowym zaznaczono wartości zawarte w dyrektywie, a kolorem granatowym w rozporządzeniu)

W tym samym zakresie spektralnym (700 ÷ 1050 nm) dla czasów ekspozycji z zakresu 10^{-9} ÷ 10 s wartości MDE w obu dokumentach są równe i wyrażone w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2). Dla czasów ekspozycji w zakresie 10^{-9} ÷ 10^3 s w rozporządzeniu zawarto wartości MDE wyrażone w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2), natomiast w dyrektywie wartości natężenia napromienienia wyrażone w watach na metr kwadratowy (W/m^2), przy czym w obydwu dokumentach jest przewidziana identyczna zależność wartości MDE od długości fali, dlatego też analiza porównawcza została przeprowadzona jedynie w funkcji czasu trwania ekspozycji dla jednej wybranej długości fali (do obliczeń wybrano długość fali 970 nm). Jak widać na podstawie dokonanej analizy, której wyniki przedstawiono na rysunku 49., w całym rozpatrywanym zakresie czasów ekspozycji wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne od zawartych w dyrektywie.



Rys. 49. Wartości MDE podczas zagrożenia termicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów ekspozycji z zakresu $10 \div 10^3$ s długości fali 970 nm (kolorem różowym oznaczono wartości zawarte w dyrektywie, natomiast kolorem granatowym w rozporządzeniu)

W przypadku czasów ekspozycji powyżej 10^3 s w obydwu dokumentach przewidziano niezależnie od czasu ekspozycji wartości natężenia napromienienia wyrażone w watach na metr kwadratowy (W/m^2) w zależności od długości fali, przy czym wartości w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne w porównaniu z wartościami zawartymi w dyrektywie. Porównanie tych wartości MDE przedstawiono na rysunku 50.

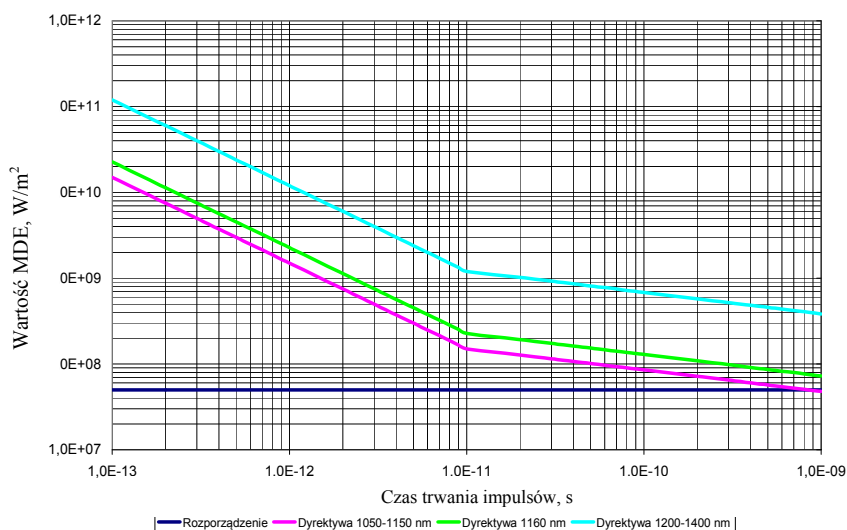


Rys. 50. Wartości MDE dla termicznego zagrożenia oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów ekspozycji z zakresu 10^3 s \div $3 \cdot 10^4$ s dla zakresu spektralnego 700 \div 1050 nm (kolorem różowym zaznaczono wartości zawarte w dyrektywie, a kolorem granatowym w rozporządzeniu)

Zagrożenie termiczne – zakres 1050 \div 1400 nm

W zakresie 1050 \div 1400 nm dla czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} w rozporządzeniu przewidziano jedną wartość MDE wyrażoną w watach na metr kwadratowy (W/m^2) niezależną od długości fali. W dyrektywie natomiast wartości wyrażono w dżulach na metr kwadratowy (J/m^2), dlatego też przy przeliczaniu wartości na natężenie napromieniania należy uwzględnić zmianę wartości w funkcji czasów trwania impulsów. Współczynnik korekcyjny C_C wprowadza dodatkowo w dyrektywie zależność wartości MDE od długości fali. Porównanie tych wartości MDE przedstawiono na rysunku 51. Zmiana wartości MDE przewidzianych w dyrektywie została wyrysowana w zakresach spektralnych 1050 \div 1150 nm oraz 1200 \div 1400 nm (w zakresach tych wartość

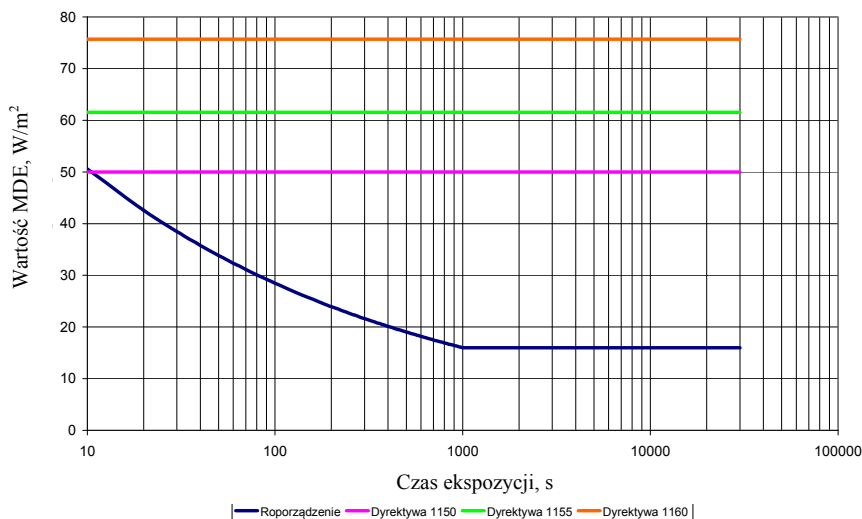
MDE nie zależy od długości fali), natomiast dla zakresu 1150 ÷ 1200 nm została wybrana jedna długość fali. Taki podział rozpatrywanego zakresu spektralnego wynika z przebiegu zmienności wartości współczynnika C_C przedstawionego na rysunku 38.



Rys. 51. Wartości MDE dla termicznego zagrożenia oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} dla zakresu spektralnego 1050 ÷ 1400 nm

W obrębie czasów ekspozycji z zakresu 10^{-9} ÷ 10 s wartości MDE przewidziane w dyrektywie są zależne od długości fali poprzez wprowadzenie współczynnika korekcyjnego C_C . Współczynnik ten dla długości fal poniżej 1150 nm jest stały i równy 1 (rys. 38.), natomiast dla dłuższych fal (1150 ÷ 1400 nm) wzrasta wraz z długością fali. Dlatego też wartości MDE w rozpatrywanym zakresie długości fal do 1150 nm są równe w obu dokumentach, natomiast dla dłuższych fal w rozporządzeniu przewidziano wartości bardziej restrykcyjne.

Dla czasów ekspozycji powyżej 10 s w dyrektywie przewidziano wartości natężenia napromienienia zależne od długości fali, podczas gdy w rozporządzeniu dla czasów poniżej 10^3 s przewidziano wartość napromienia, natomiast powyżej 10^3 s – jedną wartość natężenia napromienienia równą 16 W/m^2 . Na rysunku 52. przedstawiono ilustrację zmian wartości MDE dla rozpatrywanego przypadku. Na wykresie przedstawiono przebieg zmiany MDE w funkcji czasu ekspozycji, w przypadku dyrektywy proste odpowiadają stałej wartości MDE bez względu na czas ekspozycji, dla trzech różnych długości fal (1150; 1155 i 1160 nm). Zgodnie z wykresem można stwierdzić, iż niezależnie od długości fali wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.



Rys. 52. Wartości MDE dla termicznego zagrożenia termicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów ekspozycji z zakresu $10 \div 3 \cdot 10^4$ s dla zakresu spektralnego $1050 \div 1400$ nm

Zgodnie z przeprowadzoną analizą w całym zakresie czasów trwania ekspozycji dla różnych długości fal wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje oka na promieniowanie źródeł rozciągniętych

Jak zostało wcześniej zaznaczone, w rozporządzeniu przewidziano osobną tabelę określającą wartości MDE dla źródeł rozciągniętych. Dla zakresu widzialnego oraz IR-A ($400 \div 1400$ nm) wartości MDE są wyrażone jako luminancja energetyczna lub zintegrowana luminancja energetyczna. W dyrektywie natomiast znajdują się wartości wyrażone jako natężenie napromieniania lub napromienianie. Rozciągniętość źródła promieniowania jest uwzględniana przez zastosowanie współczynnika korekcyjnego C_E zależnego od kąta widzenia źródła. W celu porównania wartości MDE niezbędne jest przeliczenie wartości natężenia napromieniania lub napromieniania odpowiednio na luminancję energetyczną lub zintegrowaną luminancję energetyczną, zgodnie ze wzorami:

$$G = \frac{H}{A} \quad [2]$$

$$L = \frac{E}{A} \quad [3]$$

gdzie:

G – zintegrowana luminancja energetyczna ($J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$),

L – całkowita luminancja energetyczna ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$),

H – napromienienie ($J \cdot m^{-2}$),

E – natężenie napromieniania ($W \cdot m^{-2}$),

A – kąt przestrzenny w steradianach, odpowiadający wymiarowi kątowemu źródła α w radianach określony następująco:

$$A [sr] = \frac{\pi}{4} \alpha^2 \quad [4]$$

Dla źródeł rozciągniętych w poszczególnych zakresach spektralnych oraz zakresach czasów trwania ekspozycji wartości MDE zawarte w analizowanych dokumentach są zróżnicowane ze względu na: wartość kąta widzenia źródła promieniowania, czas ekspozycji oraz długość fali promieniowania. W celu dokonania porównania wartości MDE zostało rozwiązane równanie następującej postaci (ze względu na kąt α):

$$MDE_{dyr}(t, \alpha) = MDE_{rozp}(t, \alpha) \quad [5]$$

gdzie:

$MDE_{dyr}(t, \alpha)$ – funkcja opisująca wartość maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji przewidzianej w dyrektywie, przeliczona na jednostki uwzględnione w rozporządzeniu,

$MDE_{rozp}(t, \alpha)$ – funkcja opisująca wartość maksymalnej dopuszczalnej ekspozycji przewidzianej w rozporządzeniu,

t – czas trwania ekspozycji, w sekundach,

α – kąt widzenia źródła promieniowania, w miliradianach.

Następnie na podstawie przekształconego równania [4] do postaci:

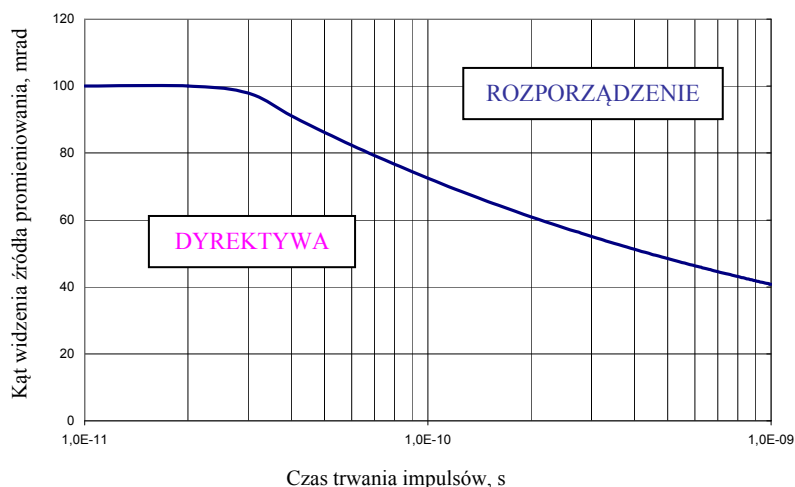
$$\alpha = f(t) \quad [6]$$

i sporządzono wykresy zmian wartości kąta α w funkcji czasu ekspozycji t , dla których wartości MDE w obu dokumentach są takie same. Na wykresach zaznaczono zakresy kątów oraz czasów ekspozycji, dla których poszczególne dokumenty są bardziej restrykcyjne. Jeżeli oznaczenie „dyrektywa” lub „rozporządzenie” znajduje się pod krzywą, wówczas oznacza to, iż dla wartości czasów ekspozycji oraz kątów widzenia źródła promieniowania poniżej krzywej dany dokument jest bardziej restrykcyjny. Analogicznie, jeżeli oznaczenie znajduje się powyżej krzywej, oznacza to, że dla tego zakresu czasów ekspozycji oraz kątów widzenia źródła promieniowania bardziej jest restrykcyjny określony dokument.

Podobnie jak w przypadku źródeł punktowych (patrzenie bezpośrednio w wiązkę), także analiza porównawcza została przeprowadzona osobno dla poszczególnych zakresów spektralnych oraz rodzaju zagrożeń.

Zagrożenie termiczne – zakres 400 ÷ 700 nm

Na rysunku 53. wyrysowano krzywą określającą wartości kątów widzenia źródła promieniowania oraz czasów ekspozycji, dla których wartości MDE w rozporządzeniu oraz w dyrektywie są równe.

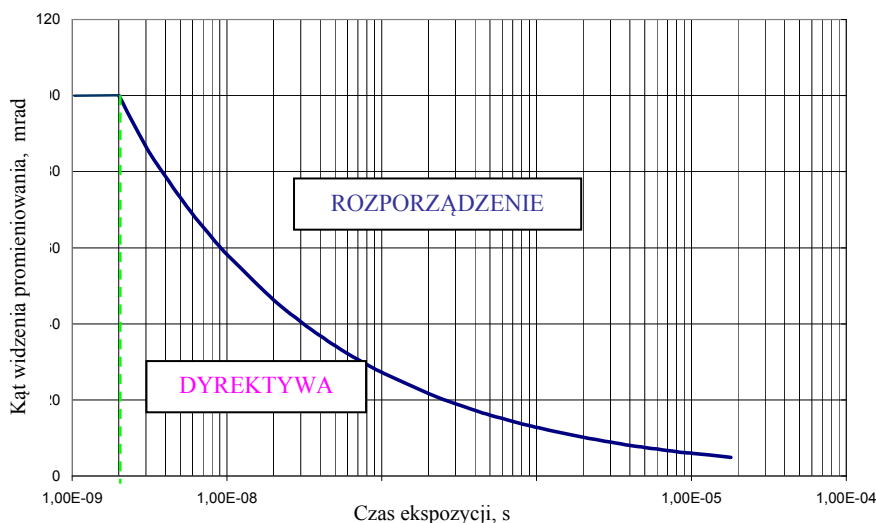


Rys. 53. Zakres kątów widzenia źródła promieniowania, przy których wartości MDE w dyrektywie oraz w rozporządzeniu są równe (zakres spektralny 400 ÷ 700 nm, czasy trwania impulsów 10^{-11} ÷ 10^{-9} s)

W zakresie krótkich impulsów ($10^{-13} \div 10^{-9}$) w szerokim zakresie kątów widzenia źródła promieniowania wartości MDE przewidziane w dyrektywie są bardziej restrykcyjne. Podstawowym powodem takiej sytuacji jest fakt, iż w rozporządzeniu nie uwzględniono zmiany wartości MDE wraz ze zmianą kąta α , ze względu na fakt, iż jest on uwzględniany w trakcie pomiarów, redukując automatycznie wartość mierzonej luminancji energetycznej.

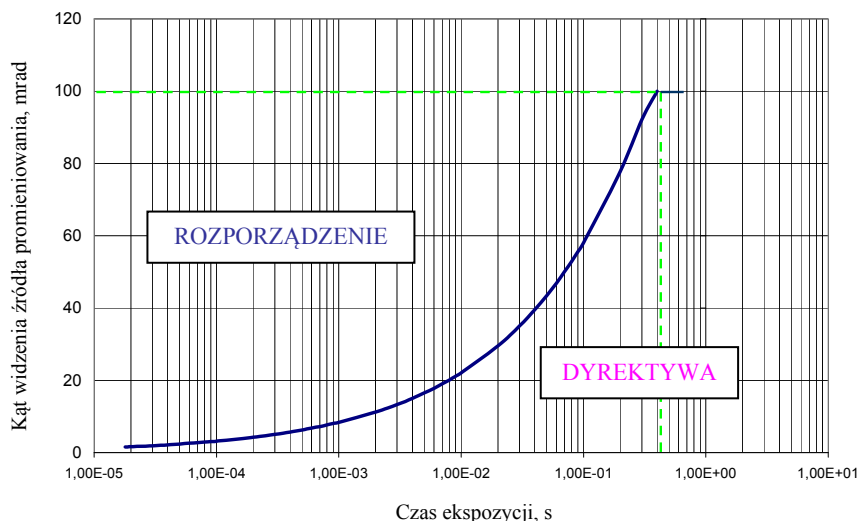
Dla czasów ekspozycji z zakresu $10^{-9} \div 10$ s w rozporządzeniu przewidziano jeden wzór do obliczania wartości MDE, w zależności od czasu ekspozycji. Natomiast w dyrektywie rozdzielono ten zakres czasów ekspozycji na dwa podzakresy $10^{-9} \div 1,8 \cdot 10^{-5}$ s oraz $1,8 \cdot 10^{-5} \div 10$ s. Wykresy rozwiązania równań $MDE_{dyr}(t, \alpha) = MDE_{rozp}(t, \alpha)$ zostały przedstawione dla dwóch opisanych podzakresów na rysunkach 54. oraz 55.

Na rysunku 54. kolorem zielonym zaznaczono punkt graniczny, dla którego wartość kąta widzenia źródła jest maksymalna (100 mrad), w dyrektywie dla kątów większych założono przyjęcie wartości kąta równej 100 mrad. W przypadku czasów trwania impulsów poniżej tego punktu wartości MDE przewidziane w dyrektywie są zawsze bardziej restrykcyjne.



Rys. 54. Zakres kątów widzenia źródła promieniowania, przy których wartości MDE dla zagrożenia termicznego w obu analizowanych dokumentach są identyczne (zakres spektralny $400 \div 700$ nm, czasy trwania impulsów $10^{-9} \div 1,8 \cdot 10^{-5}$)

Na rysunku 55. kolorem zielonym zaznaczono punkt graniczny, dla którego wartość kąta widzenia źródła jest maksymalna (100 mrad), w dyrektywie dla kątów większych założono przyjęcie wartości kąta równej 100 mrad.



Rys. 55. Zakres kątów widzenia źródła promieniowania, przy których wartości MDE w obu analizowanych dokumentach są identyczne (zakres spektralny $700 \div 1050$ nm, czasy trwania impulsów $1,8 \cdot 10^{-5} \div 10$ s)

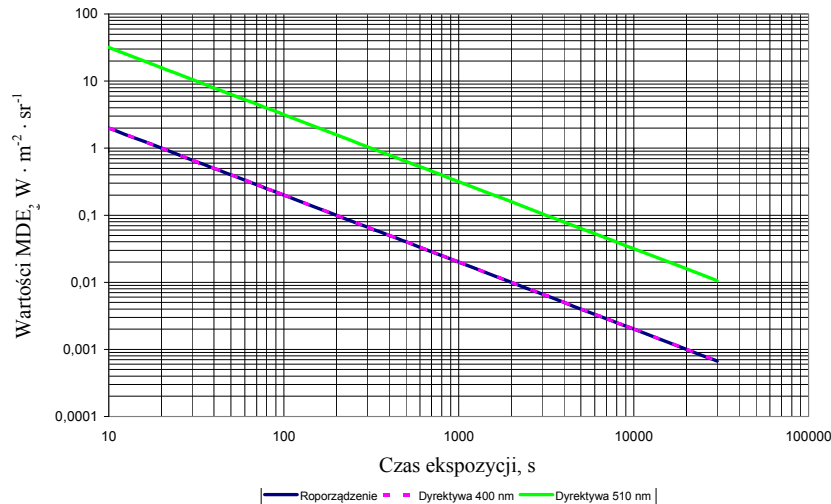
W rozpatrywanym zakresie dla czasów ekspozycji $10 \div 3 \cdot 10^4$ s wprowadzono w dyrektywie rozróżnienie wzorów do obliczeń wartości MDE w zależności od spełnienia warunku na czas ekspozycji $t \leq T_2$ (rys. 41.). Niezależnie od spełnienia wymienionego warunku wartości MDE, przewidziane w rozporządzeniu dla dopuszczalnych kątów widzenia źródła promieniowania ($\alpha_{\max} = 100$ mrad), są bardziej restrykcyjne.

Dla czasów trwania ekspozycji powyżej 10^3 s warunek $t > T_2$ (dyrektywa) będzie zawsze spełniony i niezależnie od kąta widzenia źródła promieniowania oraz czasu trwania ekspozycji. W zakresie tym wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.

Zagrożenie fotochemiczne – zakres $400 \div 600$ nm

Dla ekspozycji powyżej 10 s w dyrektywie przewidziano odrębne wartości MDE dla zagrożenia fotochemicznego siatkówki (zakres $400 \div 600$ nm) oraz termicznego (zakres $400 \div 700$ nm).

Na rysunku 56. przedstawiono został przebieg zmian wartości MDE w zakresie spektralnym $400 \div 550$ nm dla czasów ekspozycji $10 \div 10^3$ s. Wartości natężenia napromienienia określone w dyrektywie zależą od długości fali, dlatego na wykresie przedstawiono przebiegi dla dwóch długości fal promieniowania: 400 oraz 510 nm, co pozwoliło wykazać, iż w zakresie długości fal $400 \div 600$ nm wartości przewidziane w rozporządzeniu są równe lub mniejsze (bardziej restrykcyjne) niż w dyrektywie.

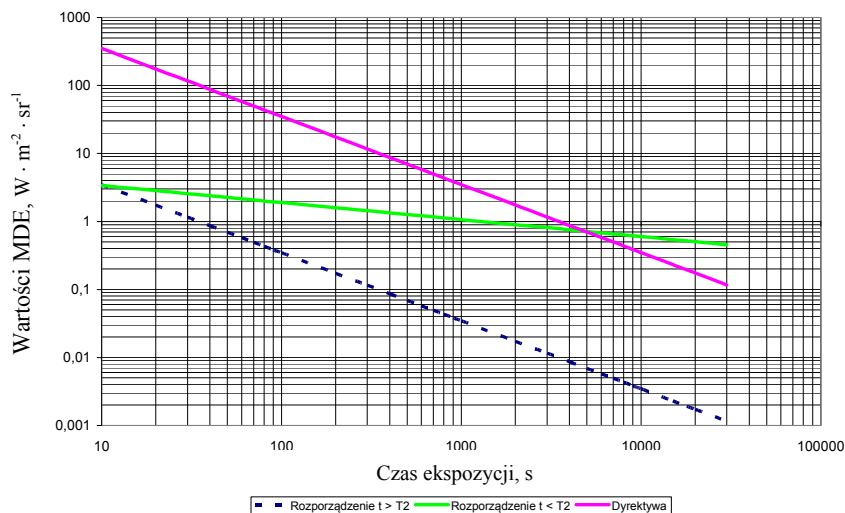


Rys. 56. Wartości MDE dla zagrożenia fotochemicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę podczas ekspozycji $10 \div 10^3$ s w zakresie spektralnym $400 \div 550$ nm

Ponieważ na rysunku 56. krzywe odpowiadające wartościom MDE w rozporządzeniu dla całego rozpatrywanego zakresu długości fal oraz w dyrektywie dla 400 nm pokrywają się, dlatego w celu zwiększenia przejrzystości rysunku krzywa oznaczająca wartości w dyrektywie została wyrzutowana linią przerywaną.

Korzystając z wyników analizy przedstawionych na wykresie 56., można stwierdzić, iż dla długości fali 400 nm i czasów ekspozycji z zakresu $10 \div 100$ s dla kąta widzenia źródła promieniowania równego 100 mrad wartości MDE w rozporządzeniu oraz dyrektywie pokrywają się, natomiast w pozostałych przypadkach analizowanego zakresu wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są mniejsze (bardziej restrykcyjne) od wartości zawartych w dyrektywie.

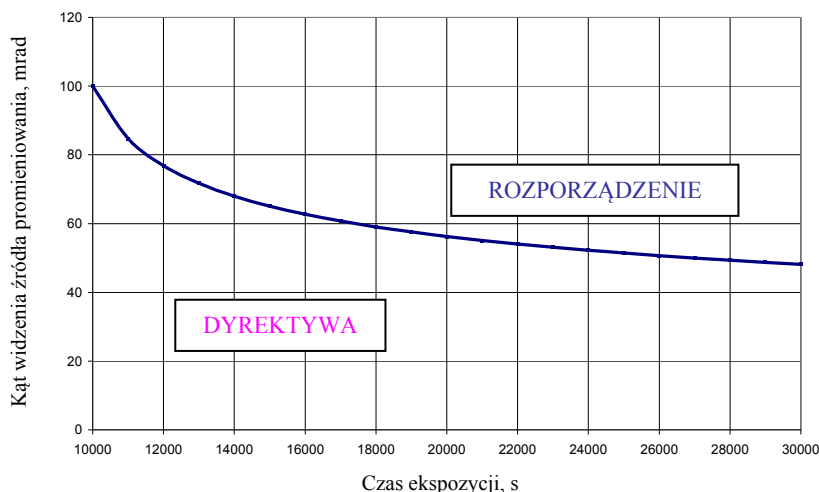
W zakresie długości fal $550 \div 600$ nm pojawia się dodatkowy warunek na czas ekspozycji związany z punktem czasowym T_2 (T_2 przyjmuje stałą wartość w zależności od długości fali), którego wykres odpowiadający wartościom z rozporządzenia został przedstawiony na rysunku 35., natomiast z dyrektywy na rysunku 41. Wartości MDE są różne, w przypadku gdy: czas ekspozycji jest większy $t > T_2$ lub mniejszy $t < T_2$ od czasu zdefiniowanego jako punkt czasowy T_2 . Wykres ilustrujący porównanie wartości MDE w rozporządzeniu (dla dwóch przypadków, gdy $t > T_2$ oraz $t < T_2$) oraz w dyrektywie przedstawiono na rysunku 57.



Rys. 57. Wartości MDE dla zagrożenia fotochemicznego oka w przypadku patrzenia bezpośrednio w wiązkę dla czasów trwania ekspozycji z zakresu $10 \div 10^4$ s w zakresie spektralnym $550 \div 600$ nm (długość fali 551 nm)

Niezależnie od spełnienia warunku na czas ekspozycji, gdy $t > T_2$ oraz $t < T_2$ wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.

Dla czasów ekspozycji powyżej 10^4 s w rozporządzeniu przewidziano stałą wartość MDE, podczas gdy w dyrektywie uzależniono ją od kąta widzenia źródła promieniowania. Wykres obrazujący ten przypadek został przedstawiony na rysunku 58.

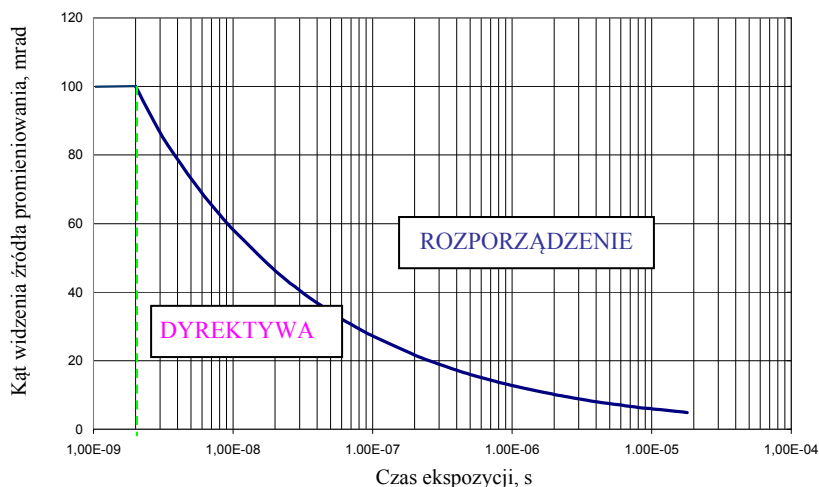


Rys. 58. Zakres czasów ekspozycji oraz kątów widzenia źródła promieniowania, dla których w poszczególnych dokumentach zawarto bardziej restrykcyjne wartości. Zakres spektralny $400 \div 700$ nm dla czasów trwania impulsów $10^4 \div 3 \cdot 10^4$ s

Zagrożenie termiczne – zakres $700 \div 1050$ nm

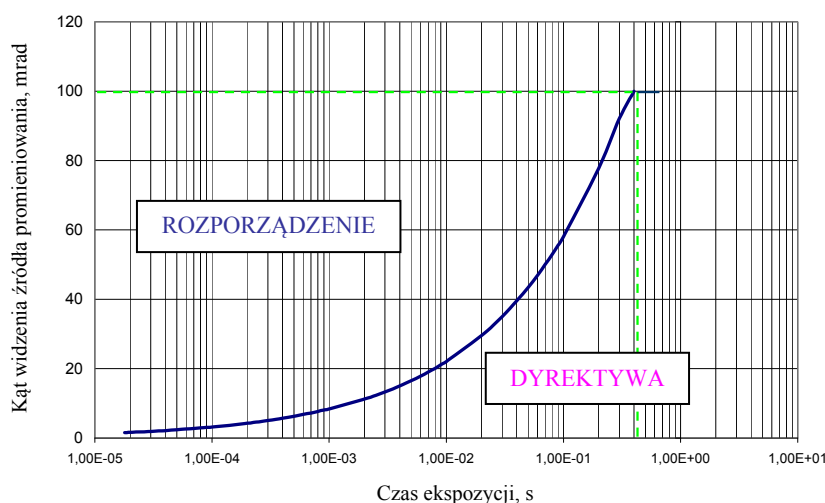
W rozpatrywanym zakresie w dyrektywie oraz w rozporządzeniu wprowadzono zróżnicowanie wartości MDE ze względu na długość fali przez wprowadzenie współczynników korekcyjnych C_4 (w rozporządzeniu) i C_A (w dyrektywie). Ponieważ w całym zakresie stosowania wartości tych współczynników są równe, dlatego też analiza porównawcza została przeprowadzona jedynie z punktu widzenia kątów widzenia źródła promieniowania oraz czasów trwania ekspozycji.

Na rysunku 59. kolorem zielonym zaznaczono punkt graniczny, dla którego wartość kąta widzenia źródła jest maksymalna (100 mrad), w dyrektywie dla kątów większych założono przyjęcie wartości kąta równej 100 mrad. W przypadku czasów trwania impulsów poniżej tego punktu, wartości MDE przewidziane w dyrektywie są zawsze bardziej restrykcyjne.



Rys. 59. Zakres kątów widzenia źródła promieniowania, przy których wartości MDE w obu analizowanych dokumentach są identyczne. Zakres spektralny $700 \div 1050$ nm (czasy trwania impulsów $10^{-9} \div 1,8 \cdot 10^{-3}$)

Na rysunku 60. kolorem zielonym zaznaczono punkt graniczny, dla którego wartość kąta widzenia źródła jest maksymalna (100 mrad), w dyrektywie dla kątów większych założono przyjęcie wartości kąta równej 100 mrad. W przypadku czasów trwania impulsów poniżej tego punktu wartości MDE przewidziane w dyrektywie są zawsze bardziej restrykcyjne.



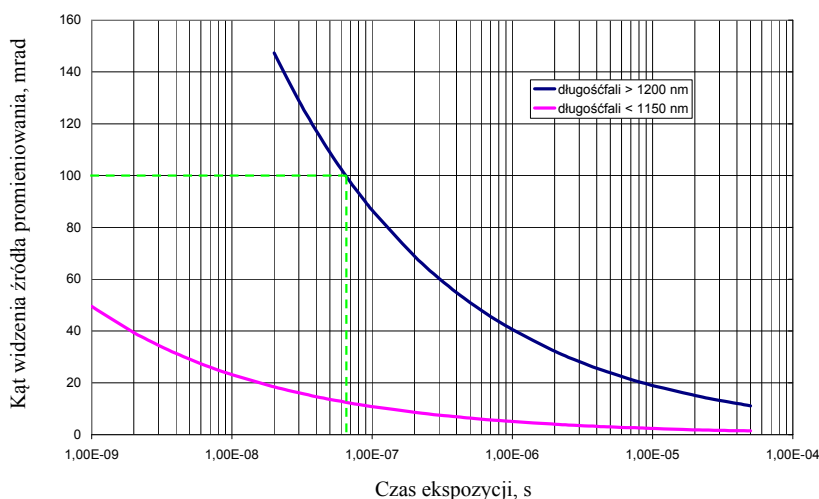
Rys. 60. Zakres kątów widzenia źródła promieniowania, przy których wartości MDE w obu analizowanych dokumentach są identyczne. Zakres spektralny 700 ÷ 1050 nm (czasy trwania impulsów $1,8 \cdot 10^{-5} \div 10$ s)

W rozpatrywanym zakresie dla czasów ekspozycji $10 \div 3 \cdot 10^4$ s w dyrektywie wprowadzono rozróżnienie wzorów do obliczeń wartości MDE, w zależności od spełnienia warunku na czas ekspozycji $t \leq T_2$ (rys. 40.). Niezależnie od spełnienia wymienionego warunku wartości MDE dla dopuszczalnych kątów widzenia źródła promieniowania ($\alpha_{\max} = 100$ mrad) przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.

Dla czasów trwania ekspozycji powyżej 10^3 s warunek $t > T_2$ (w dyrektywie) będzie zawsze spełniony i niezależnie od kąta widzenia źródła promieniowania oraz czasu trwania ekspozycji wartości przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.

Zagrożenie termiczne – zakres 1050 ÷ 1400 nm

Na rysunku 61. przedstawiono przebieg zmian kąt widzenia źródła promieniowania w funkcji czasu trwania ekspozycji, dla którego wartości MDE w obu dokumentach pokrywają się.



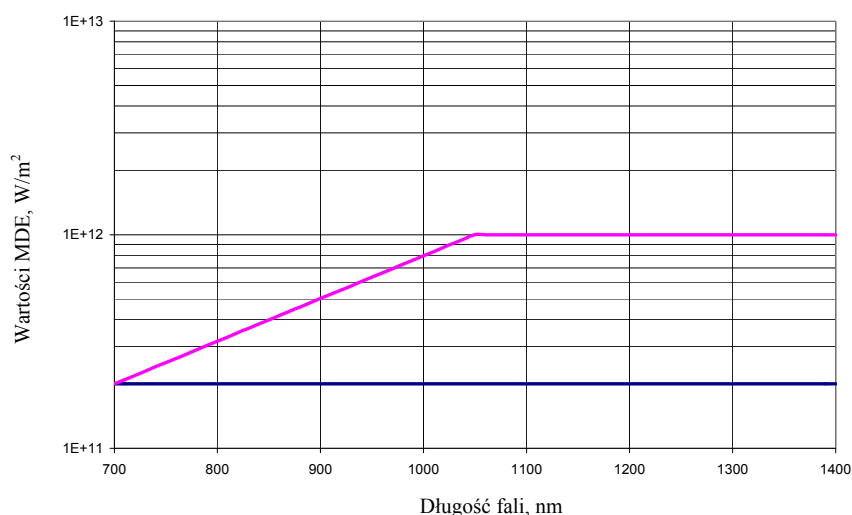
Rys. 61. Zakres kątów widzenia źródła promieniowania, przy których wartości MDE w obu analizowanych dokumentach są identyczne. Zakres spektralny 1050 ÷ 1400 nm (czasy trwania impulsów $10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-5}$ s)

Ponieważ wartości MDE zależą od trzech parametrów (kąta widzenia źródła promieniowania, czasu trwania ekspozycji oraz długości fali), dlatego też na rysunku 61. przedstawiono dwie charakterystyki odnoszące się do zakresów, w których współczynnik zależny od długości fali przyjmuje wartości ekstremalne – minimalną równą 1 dla długości fali 1150 nm oraz maksymalną równą 8 dla długości fali 1200 nm.

Maksymalne dopuszczalne ekspozycje skóry na promieniowanie laserowe

W przypadku zagrożenia skóry promieniowaniem laserowym nie ma rozróżnienia wartości MDE dla źródeł punktowych oraz źródeł rozciągniętych.

Wartości graniczne ekspozycji skóry na promieniowanie laserowe zawarte w dyrektywie oraz w rozporządzeniu w przypadku czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} s nie zależą od czasu ekspozycji. Dla czasów impulsów $< 10^{-9}$ s w zakresie spektralnym $400 \div 700$ nm wartości MDE pokrywają się w obydwu dokumentach i wynoszą $E = 2 \cdot 10^{11}$ W/m². W zakresie $700 \div 1400$ nm w dyrektywie wprowadzono rozróżnienie wartości MDE w funkcji długości fali przez wprowadzenie współczynnika korekcyjnego C_A , podczas gdy wartość w rozporządzeniu jest stała, różnicę tę zilustrowano na rysunku 62. Zgodnie z rysunkiem w rozporządzeniu przewidziano w tym zakresie bardziej restrykcyjne wartości MDE.



Rys. 62. Wartości MDE dla czasów trwania impulsów $< 10^{-9}$ s w zakresie spektralnym $700 \div 1400$ nm (kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą)

Dla czasów ekspozycji $10^{-9} \div 3 \cdot 10^4$ s w dyrektywie wprowadzono współczynnik korekcyjny C_A zwiększający wartości MDE dla długości fal powyżej 700 nm. W rozporządzeniu natomiast wartość MDE jest stała i w całym zakresie mniejsza od wartości MDE przewidzianych w dyrektywie. Zatem dla pozostałych przypadków wykresy zmian wartości MDE w funkcji długości fali będą analogiczne jak na rysunku 39. W tabeli 19. porównano restrykcyjności dokumentów w analizowanym zakresie.

Tabela 19.

Porównanie restrykcyjności wartości MDE skóry zawartych w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu z 2002 r.

Zakres długości fali, nm	Czas trwania ekspozycji, s					
	$< 10^{-9}$	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10^{-3}$	$10^{-3} \div 10^1$	$10^1 \div 10^3$	$10^3 \div 3 \cdot 10^4$
400 ÷ 700	równoważne	równoważne	równoważne	równoważne	równoważne	równoważne
700 ÷ 1400	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie	rozporządzenie

Zakres promieniowania IR-B oraz IR-C

Promieniowanie określane jako IR-B oraz IR-C dotyczy zakresu promieniowania elektromagnetycznego z zakresu długości fal $1400 \div 10^6$ nm, jest to zarazem najszerszy spośród rozpatrywanych zakresów. W obrębie tego zakresu występuje jedynie zagrożenie termiczne rogówki oka lub skóry.

Porównanie wartości MDE w rozpatrywanym zakresie przeprowadzono dla zagrożeń oczu oraz zagrożeń skóry.

Zagrożenie oczu

Promieniowanie z rozpatrywanego zakresu nie jest ogniskowane na siatkówce przez elementy budowy oka, dlatego nie występuje w tym przypadku rozróżnienie na źródła punktowe oraz rozciągłe. W rozporządzeniu wartości MDE w tabelach dla źródeł rozciągłych oraz punktowych są identyczne, natomiast w dyrektywie nie zostaje wprowadzony współczynnik korekcyjny C_E .

Obydwa porównywane dokumenty dzielą rozpatrywany zakres na podzakresy:

- w rozporządzeniu:
 - 1400 ÷ 1530 nm
 - 1530 ÷ 1550 nm
 - 1550 ÷ 10^6 nm
- w dyrektywie:
 - 1400 ÷ 1500 nm
 - 1500 ÷ 1800 nm
 - 1800 ÷ 2600 nm
 - 2600 ÷ 10^6 nm.

Dla czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} s w rozporządzeniu przewidziano jedną wartość MDE dla całego rozpatrywanego zakresu spektralnego $1400 \div 10^6$ nm, natomiast w dyrektywie przewidziano różne wartości w różnych podzakresach widmowych. Wartości MDE zestawiono w tabeli 20.

Tabela 20.

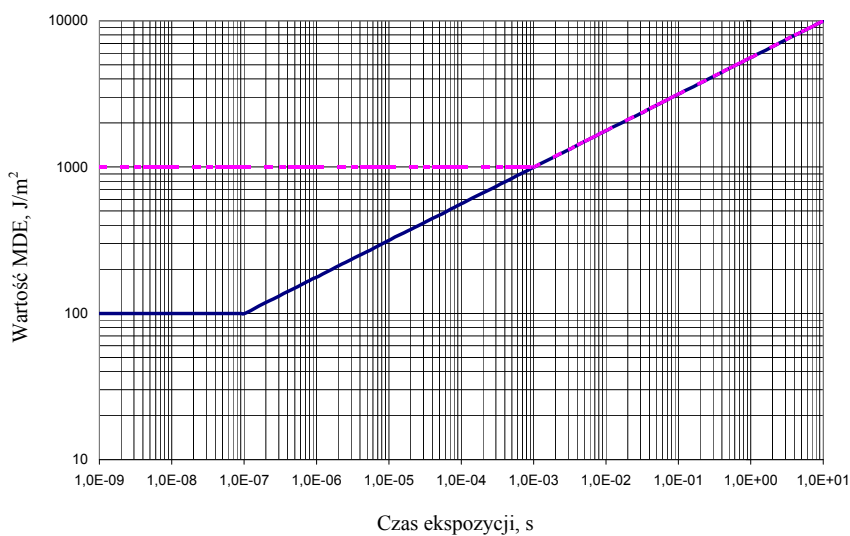
Zestawienie wartości MDE znajdujących się w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu z 2002 r. dla zakresu spektralnego $1400 \div 10^6$ nm dla czasów trwania impulsu poniżej 10^{-9} s

Zakres długości fali, nm	Wartości MDE, W/m ²		Wartości bardziej restrykcyjne
	w rozporządzeniu	w dyrektywie	
1400 ÷ 1500	10^{11}	10^{12}	w rozporządzeniu
1500 ÷ 1800	10^{11}	10^{13}	w rozporządzeniu
1800 ÷ 2600	10^{11}	10^{12}	w rozporządzeniu
2600 ÷ 10^6	10^{11}	10^{11}	w rozporządzeniu

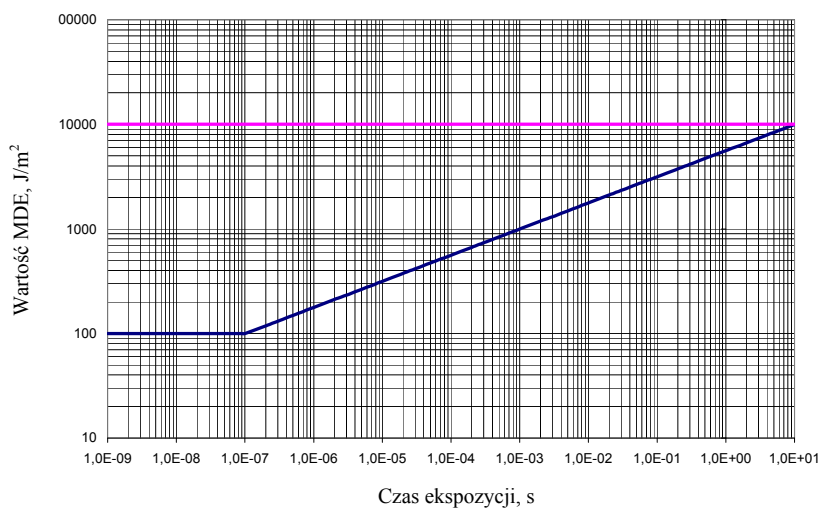
Ze względu na różnice w podziale zakresu IR-B oraz IR-C w dwóch rozpatrywanych dokumentach do obliczeń przyjęto sześć podzakresów:

- 1400 ÷ 1500 nm
- 1500 ÷ 1530 nm
- 1530 ÷ 1550 nm
- 1550 ÷ 1800 nm
- 1800 ÷ 2600 nm
- 2600 ÷ 10⁶ nm.

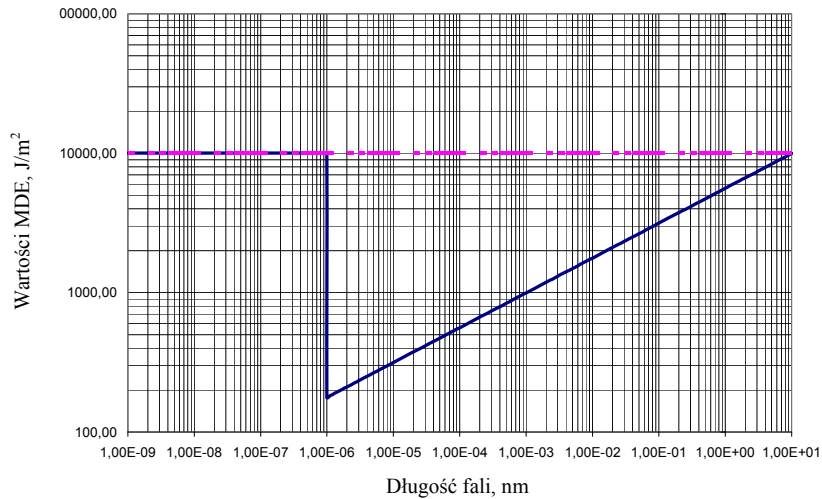
Na rysunkach 63. ÷ 68. przedstawiono porównanie wartości MDE w obrębie czasów ekspozycji 10⁻⁹ ÷ 10 s dla wymienionych wcześniej podzakresów spektralnych.



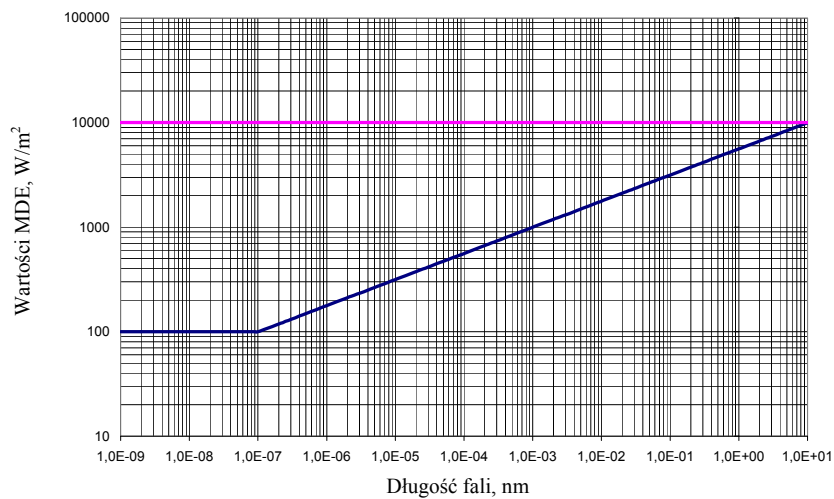
Rys. 63. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji 10⁻⁷ ÷ 10 s w zakresie 1400 ÷ 1500 nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



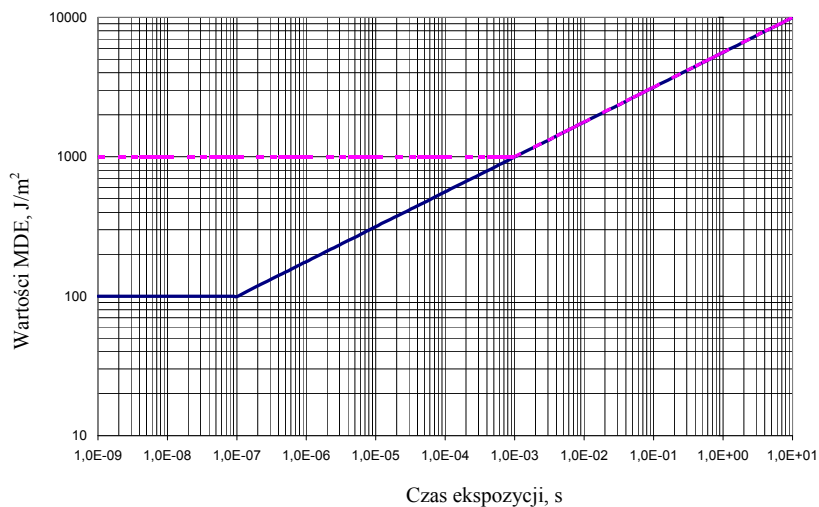
Rys. 64. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji 10⁻⁷ ÷ 10 s w zakresie 1500 ÷ 1530 nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



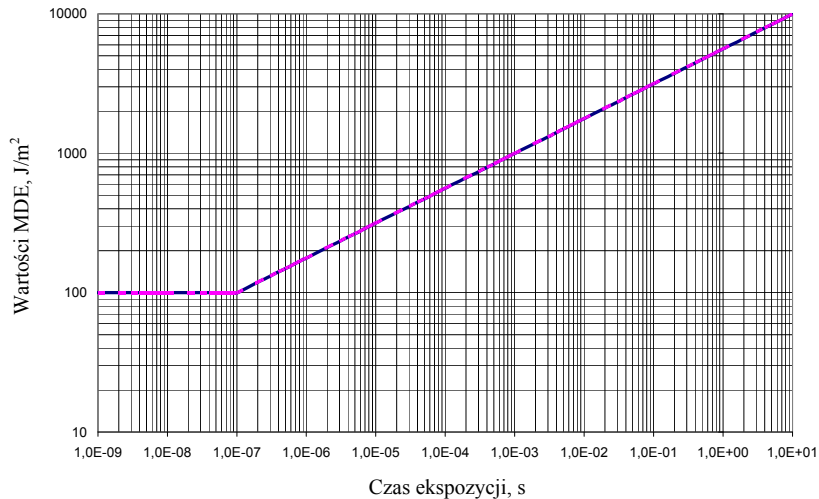
Rys. 65. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie $1530 \div 1550$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



Rys. 66. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie $1550 \div 1800$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



Rys. 67. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie $1800 \div 2600$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



Rys. 68. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie $2600 \div 10^6$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą

Na podstawie analiz przedstawionych na rysunkach 63. ÷ 68. można stwierdzić wyraźne różnice między wartościami MDE zawartymi w obu analizowanych dokumentach. We wszystkich przypadkach wartości MDE zawarte w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne lub równoważne wartościom zawartym w dyrektywie. W tabeli 21. przedstawiono zestawienie restrykcyjności wartości MDE zawartych w analizowanych dokumentach.

Tabela 21.

Porównanie wartości MDE w rozporządzeniu z 2002 r. oraz w dyrektywie 2006/25/WE

Zakres długości fali, nm	Czas ekspozycji, s				
	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$	$10^{-6} \div 10^{-5}$	$10^{-5} \div 10^{-3}$	$10^{-3} \div 10$
1400 ÷ 1500	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	równoważne
1500 ÷ 1530	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu
1530 ÷ 1550	równoważne	równoważne	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu
1550 ÷ 1800	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu
1800 ÷ 2600	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	równoważne
$2600 \div 10^6$	równoważne	równoważne	równoważne	równoważne	równoważne

Dla czasów ekspozycji powyżej 10 s w obydwu dokumentacjach przewidziano jedną wartość MDE równą 1000 W/m^2 , niezależnie od długości fali.

Zagrożenie skóry

Dla czasów trwania impulsów poniżej 10^{-9} s w rozporządzeniu przewidziano, podobnie jak w przypadku wartości MDE oka na promieniowanie laserowe, jedną wartość MDE dla całego rozpatrywanego zakresu spektralnego $1400 \div 10^6$ nm, natomiast w dyrektywie przewidziano różne wartości MDE w różnych podzakresach. Wartości MDE zostały zestawione w tabeli 22.

Tabela 22.

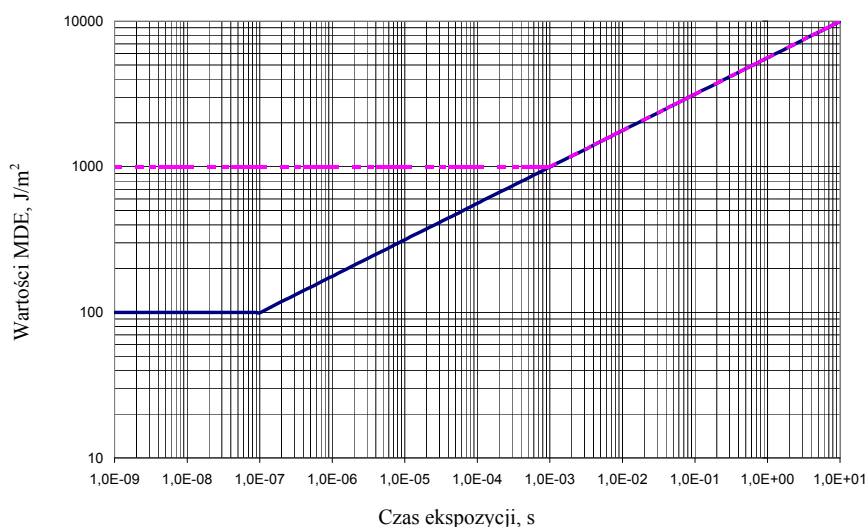
Zestawienie wartości MDE znajdujących się w dyrektywie 2006/25/WE oraz w rozporządzeniu z 2002 r. dla zakresu spektralnego $1400 \div 10^6$ nm dla czasów trwania impulsu poniżej 10^{-9} s

Zakres długości fali, nm	Wartości MDE, W/m ²		Wartości bardziej restrykcyjne
	w rozporządzenie	w dyrektywie	
1400 ÷ 1500	10^{11}	10^{12}	w rozporządzeniu
1500 ÷ 1800	10^{11}	10^{13}	w rozporządzeniu
1800 ÷ 2600	10^{11}	10^{12}	w rozporządzeniu
2600 ÷ 10^6	10^{11}	10^{11}	równoważne

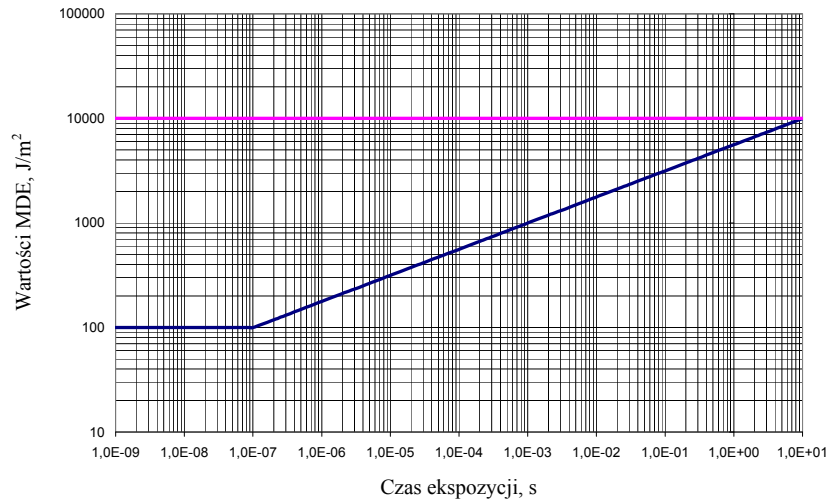
W zakresie spektralny $1400 \div 10^6$ nm w dyrektywie wartości MDE dla skóry zagrożone promieniowaniem laserowym są identyczne jak wartości MDE dla oka. W dyrektywie podzielono zatem zakres spektralny na cztery podzakresy:

- 1400 ÷ 1500 nm
- 1500 ÷ 1800 nm
- 1800 ÷ 2600 nm
- 2600 ÷ 10^6 nm.

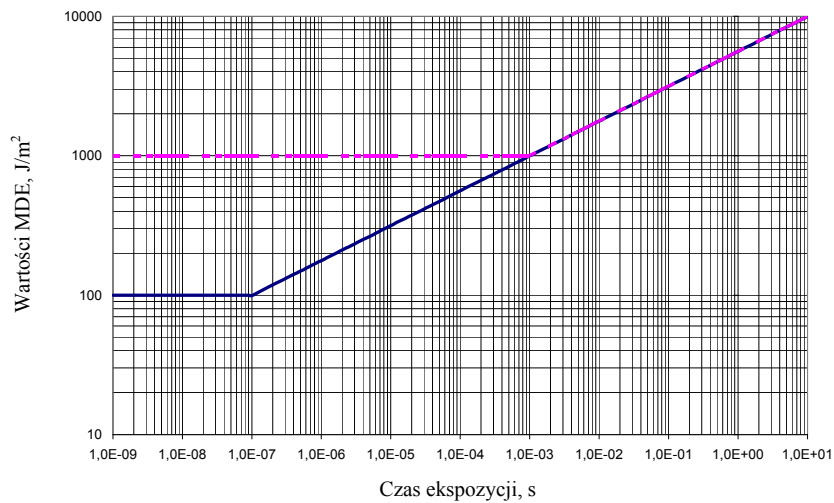
W rozporządzeniu nie uwzględniono zmian wartości MDE w funkcji długości fali, dlatego analizę porównawczą przeprowadzono w czterech rozpatrywanych przez dyrektywę podzakresach spektralnych. Na rysunkach 69. ÷ 72. przedstawiono porównanie wartości MDE w obrębie czasów ekspozycji $10^{-9} \div 10$ s dla tych podzakresów.



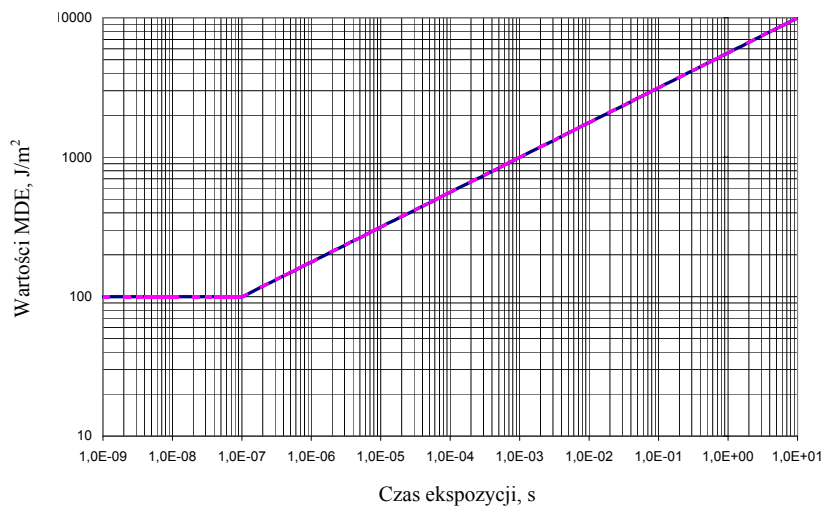
Rys. 69. Wartości MDE w funkcji czasu ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie spektralnym 1400 ÷ 1500 nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



Rys. 70. Wartości MDE w funkcji czasu ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie spektralnym $1500 \div 1800$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



Rys. 71. Wartości MDE skóry w funkcji czasu ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie spektralnym $1800 \div 2600$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą



Rys. 72. Wartości MDE w funkcji czasu trwania ekspozycji $10^{-7} \div 10$ s w zakresie spektralnym $2600 \div 10^6$ nm. Kolorem granatowym zaznaczono wartości MDE wyliczone zgodnie z rozporządzeniem, natomiast kolorem różowym zgodnie z dyrektywą

Na podstawie analiz porównawczych przedstawionych na rysunkach 69. ÷ 72. można stwierdzić wyraźne różnice między wartościami MDE zawartymi w obu analizowanych dokumentach. W analizowanych przypadkach wartości MDE zawarte w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne lub równoważne wartościom zawartym w dyrektywie. W tabeli 23. przedstawiono zestawienie restrykcyjności wartości MDE zawartych w analizowanych dokumentach.

Tabela 23.

Porównanie restrykcyjności wartości MDE w rozporządzeniu z 2002 r. oraz w dyrektywie 2006/25/WE

Zakres długości fali, nm	Czas ekspozycji, s				
	$10^{-9} \div 10^{-7}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$	$10^{-6} \div 10^{-5}$	$10^{-5} \div 10^{-3}$	$10^{-3} \div 10$
1400 ÷ 1500	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	równoważne
1500 ÷ 1800	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu
1800 ÷ 2600	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	w rozporządzeniu	równoważne
2600 ÷ 10^6	w rozporządzeniu	równoważne	równoważne	równoważne	równoważne

Zgodnie z wynikami analizy zestawionymi w tabeli 23., praktycznie w całym zakresie promieniowania IR-B oraz IR-C wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne.

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Analiza mechanizmów oddziaływania promieniowania laserowego na tkanki oraz przypadków uszkodzenia tkanek

Promieniowanie laserowe z całego zakresu długości fal promieniowania optycznego (180 nm ÷ 1 mm) może wywoływać w tkance skutki termiczne. Może to być: wzrost temperatury tkanki, koagulacja, waporyzacja, fotoablacja oraz skutki elektromechaniczne. Skutki te zależą od: wartości mocy promieniowania padającego na tkankę, widmowego współczynnika absorpcji oraz czasu trwania impulsu. Zjawisko fotoablacji może występować w przypadku ekspozycji na promieniowanie impulsowe, którego długość fali odpowiada ekstremalnie wysokiej wartości współczynnika absorpcji narażanej tkanki. Ekstremalnym skutkiem oddziaływania promieniowania laserowego na tkanki są zjawiska elektromechaniczne polegające na przebiciu tkanki i wytworzeniu mikroplazmy na jej powierzchni oraz wzbudzeniu fali akustycznej w ośrodku. Zupełnie inaczej wygląda oddziaływanie impulsów promieniowania laserowego o czasie trwania rzędu piko- i femtosekund. W tym zakresie dominują procesy polowe wywołane polem elektrycznym wiązki promieniowania.

Skutek oddziaływania promieniowania laserowego z tkanką bardzo silnie zależy od czasu trwania impulsów laserowych. Ta sama energia niesiona przez promieniowanie w krótszym impulsie charakteryzuje się większą 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 narażanej tkance, natomiast dla impulsów dłuższych – do waporyzacji i zwęglenia tkanki.

Występowanie fotoablacji oraz skutków elektromechanicznych zachodzi w przypadku: ekspozycji promieniowaniem o ultrakrótkich impulsach promieniowania laserowego, wysokich mocach szczytowych lub ekstremalnie dużych wartościach współczynnika absorpcji. Przy ocenie zagrożenia promieniowaniem laserowym zazwyczaj rozpatrujemy zagrożenia termiczne.

W przypadku promieniowania z zakresu długości fal $180 \div 600$ nm oprócz oddziaływań termicznych zachodzą w tkankach skutki fotochemiczne, co przy ocenie zagrożenia powinno być uwzględnione. Do skutków oddziaływania fotochemicznego zalicza się:

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

W zakresie nadfioletu ($180 \div 400$ nm) promieniowanie laserowe jest absorbowane głównie przez proteiny. Natomiast w zakresie promieniowania widzialnego oraz bliskiej podczerwieni IR-A ($400 \div 1000$ nm) głównym absorberem jest melanina (naturalny barwnik skóry). W pozostałym zakresie podczerwieni, powyżej $1 \mu\text{m}$, praktycznie całe promieniowanie laserowe jest absorbowane przez znajdującą się w tkankach wodę, co ma swoje odzwierciedlenie w widmowej charakterystyce absorpcyjnej poszczególnych tkanek.

W zależności od wartości widmowego współczynnika absorpcji różna jest głębokość wnikań promieniowania laserowego w obszar tkanki. Uszkodzenia powstałe na skutek ekspozycji na promieniowanie, dla którego współczynnik absorpcji jest mały, są znacznie groźniejsze, gdyż promieniowanie głębiej wnika, a uszkodzenia trudniej się goją.

Tkanką najbardziej zagrożoną w przypadku narażenia oka na promieniowanie laserowe (z zakresu $400 \div 1400$ nm) jest siatkówka. Promieniowanie to jest dodatkowo bardzo silnie ogniskowane przez elementy optyczne oka (w rezultacie natężenie napromienienia na siatkówce oka jest do 500 000 razy większe niż na rogówce).

Promieniowanie charakteryzujące się dużą wartością natężenia napromienienia (ultrakrótkie impulsy o czasie trwania z zakresu ps lub ns) może wywołać pojawianie się skutków nieliniowych w elementach oka, co prowadzi do jeszcze silniejszego ogniskowania tego promieniowania z zakresu $400 \div 1400$ nm na powierzchni siatkówki, a tym samym zwiększa niebezpieczeństwo wystąpienia uszkodzeń.

Promieniowanie w zakresie $400 \div 1400$ nm generuje bardzo dużą liczbę laserów. Zakres ten obejmuje promieniowanie widzialne, a także bliską podczerwień IR-A. W przypadku promieniowania z zakresu widzialnego występują bezwarunkowe odruchy obronne oka ograniczające czas ekspozycji do 0,25 s. Znacznie gorsza sytuacja ma miejsce w przypadku promieniowania IR-A, gdyż jest ono niewidoczne dla ludzkiego oka i często osoba narażona może sobie nie zdawać sprawy z występującej ekspozycji. W zakresie promieniowania IR-A generuje jeden z powszechniej stosowanych w praktycznie wszystkich gałęziach gospodarki laser Nd:YAG (1064 nm) i to właśnie w jego przypadku najczęściej dochodzi do uszkodzeń siatkówki oka promieniowaniem laserowym.

Analiza przypadków uszkodzenia oczu oraz skóry wywołanego ekspozycją na promieniowanie laserowe pozwala stwierdzić, iż w zdecydowanej większości przypadków są to skutki oddziaływania termicznego. Powstałe wówczas obrażenia są to najczęściej: zaczerwienienie i obrzęk, krwotok, powstawanie bruzd, koagulacja tkanki, odklejanie siatkówki, a także w skrajnych przypadkach waporyzacja lub zwęglenie tkanki.

W przypadku promieniowania laserowego zagrożenia fotochemiczne występują znacznie rzadziej i nie zawsze kojarzy się je z ekspozycją na promieniowanie laserowe.

Promieniowanie nadfioletowe generowane przez lasery excimerowe, a w szczególności o długości fali 308 nm emitowane przez laser XeCl, powoduje dość szybkie powstawanie zaćmy, a także takich uszkodzeń o charakterze fotochemicznym, jak: zapalenie rogówki i spojówki oraz nowotwory skóry. Zagrożenie zaćmą wynika z charakterystyki absorpcyjnej elementów optycznych oka. Transmisja rogówki oraz cieczy wodnistej jest duża przy jednoczesnej dość dużej absorpcji tego promieniowania w soczewce.

Analiza porównawcza kryteriów oceny zagrożenia promieniowaniem laserowym oraz wartości MDE zawartych w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z 2002 r. oraz w dyrektywie 2006/25/WE

W obu analizowanych dokumentach wartości MDE są odniesione do: długości fali, czasu trwania impulsu lub czasu trwania ekspozycji, rodzaju tkanki narażonej na uszkodzenie (oko, skóra), charakteru ekspozycji i rozmiaru obrazu na siatkówce oka. W związku z powyższym wartości graniczne ekspozycji oka oraz skóry są bardzo zróżnicowane.

Zagrożenie promieniowaniem impulsowym w obu dokumentach rozpatruje się ze względu na zagrożenie:

- pojedynczym impulsem
- ciągiem impulsów (średnia moc ciągu impulsów)
- grupą impulsów w obrębie ciągu impulsów.

Zróżnicowanie wartości MDE w obu dokumentach zależy głównie od widmowego współczynnika absorpcji promieniowania laserowego w różnego rodzaju substancjach biologicznych (proteiny, melaniny i wody), a w zakresie 400 ÷ 1400 nm także od widmowego współczynnika transmisji elementów optycznych oka (rogówki, cieczy wodnistej, soczewki i ciała szklanego).

W rozporządzeniu nie uwzględniono podziału zagrożeń na fotochemiczne oraz termiczne, natomiast w dyrektywie wyraźnie określono dla siatkówki oka zagrożenie termiczne (400 ÷ 700 nm) oraz fotochemiczne (400 ÷ 600 nm), przy czym zagrożenia fotochemiczne w dyrektywie uwzględniono dla czasów ekspozycji powyżej 10 s. W celu analizy zagrożeń promieniowaniem laserowym z zakresu 400 ÷ 600 nm niezbędne jest wyznaczenie wartości MDE dla zagrożenia termicznego oraz fotochemicznego i wybranie wartości bardziej restrykcyjnej.

W obu dokumentach wartości MDE są równe dla wartości granicznych rozdzielających przyjęte zakresy długości fali oraz czasów ekspozycji. Do oceny można zatem wykorzystywać dowolną z dwóch wartości.

W dyrektywie wprowadzono zróżnicowanie wartości MDE ze względu na czas trwania impulsów dla czasów poniżej 10^{-9} s, podczas gdy w rozporządzeniu rozpatruje się jeden zakres.

W zakresie promieniowania 180 ÷ 400 nm wartości MDE zestawione w obu analizowanych dokumentach są praktycznie równe, a nieznaczne odchylenia wartości wynikają z przyjętych zaokrągleń. W żadnym jednak dokumencie nie sprecyzowano, jakie zagrożenie należy oceniać (termiczne i/lub fotochemiczne) oraz, jaki czas ekspozycji należy przy tej analizie przyjąć (jednorazowej czy całkowitej ekspozycji).

W obrębie promieniowania z zakresu 400 ÷ 1400 nm dla źródeł punktowych (patrzenie bezpośrednio w wiązkę) wartości MDE przewidziane w rozporządzeniu są bardziej restrykcyjne lub równoważne z wartościami przewidzianymi w dyrektywie. W żadnym analizowanym przypadku

wartości MDE w dyrektywie nie są bardziej restrykcyjne. W tym samym zakresie dla źródeł rozciągłych pojawiają się wartości kątów widzenia źródła promieniowania oraz czasów ekspozycji, powyżej których bardziej restrykcyjne wartości MDE są w dyrektywie, natomiast poniżej tych wartości bardziej restrykcyjne wartości są w rozporządzeniu.

W zakresie 400 ÷ 1400 nm dla źródeł rozciągłych w rozporządzeniu określono wartości MDE jako luminancję energetyczną źródła promieniowania, co jest jednoznaczne z uwzględnieniem wielkości kątowej źródła promieniowania również przy pomiarze tego parametru. Natomiast w dyrektywie dla tego samego zakresu określono wartości MDE jako natężenie napromienia, a kąt widzenia uwzględniono przez współczynnik korekcyjny C_E . Można zatem stwierdzić, że w rozporządzeniu uwzględniono kąt widzenia źródła promieniowania na etapie pomiaru, natomiast w dyrektywie 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 w rozporządzeniu są znacznie bardziej restrykcyjne. W pojedynczych przypadkach dla określonych długości fal z początku podzakresów wartości te w obu dokumentach są równe. Dla długości fal > 2600 nm i wszystkich czasów ekspozycji oraz dla zakresu od 1400 ÷ 10⁶ nm i czasów ekspozycji > 10 s wartości MDE w obu dokumentach są równe.

ZAKRES BADAŃ WSTĘPNYCH I OKRESOWYCH

Zgodnie z rozporządzeniem ministra zdrowia i opieki społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzenia badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy (DzU z dnia 25 czerwca 1996 r.) w przypadku pracy przy urządzeniach laserowych zakres badań obejmuje:

Zakres badania wstępnego

Badanie lekarskie ogólne, ze zwróceniem uwagi na skórę oraz badanie okulistyczne.
Badania pomocnicze: w zależności od wskazań.

Zakres badań okresowych

Badanie lekarskie ogólne, ze zwróceniem uwagi na skórę oraz badanie okulistyczne.
Badania pomocnicze: w zależności od wskazań.

Częstotliwość badań okresowych: co 3 lata.

PIŚMIENNICTWO

- Boas D.A.* (1996) Diffuse photon probes of structural and dynamical properties of turbid media. Theory and Biomedical Applications [rozprawa doktorska]. Pennsylvania, University of Pennsylvania.
- Cysewska-Sobusiak A.* (1995) Problemy metrologiczne identyfikacji cech obiektu żywego poddanego nieinwazyjnej transluminacji. Rozprawa habilitacyjna. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- 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 (promieniowaniem optycznym), (dziewiętnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG).
- GUS. Biuletyn (2007) Warszawa, GUS.
- Hale G.M., Query M.R.* (1973) Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region. Appl. Opt. 12, 3, 555–563.
- Kaczmarek F. (1986) Wstęp do fizyki laserów. Warszawa, PWN.
- Kaczmarek S., Mierczyk Z., Kuzaka B.* (1994) Oddziaływanie promieniowania laserowego na tkankę biologiczną. Wiadomości lekarskie XLVII, 21–24.
- Konieczny P., Wolska A., Świdorski J., Zajac A.* (2007) Symulacja zagrożeń promieniowaniem laserowym odbitym i rozproszonym oraz wybrane aspekty projektowania osłon przed tym promieniowaniem. Biuletyn WAT LVI, 1.
- Laser Professionals [Materiały szkoleniowe].
- Mainster M.A., Stuck B.E., Brown J.* (2004) Assessment of alleged retinal laser injuries. Arch. Ophthalmol. 122, 1210–1217.
- Mierczyk Z. i in.* (2005) Badanie własności optycznych i spektroskopowych monokryształów wolframów domieszkowanych jonami Er i Yb – nowych ośrodków aktywnych do mikrolaserów „bezpiecznych dla oka”. Biuletyn WAT LIV, 12.
- van B. Nakagawara, R.W. Montgomery* (2001) Laser pointers: their potential affects on vision and aviation safet. U.S. Department of Transportation.
- PN-T 06704: 2003. Zestawienie maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji dla niekoherentnego (nielaserowego) promieniowania optycznego.
- PN EN 60825 –1: 2005. Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 1: Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika.
- Robertson M. i in.* (2005) Retinopathy from a green laser pointer. Arch. Ophthalmol. 123, 629–633.
- Rockwell Laser Industries. Ins., RLI Laser Accident Database [baza danych].
- Rodney D., Hollifield M.D.* (2003) Ocular laser injuries. [W:] Ophthalmic care of the combat casualty. Washington.
- 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 (DzU nr 217, poz. 1833).
- Sell C.H., Bryan J.S.* (1999) Maculopathy from handheld diode laser pointer. Arch. Ophthalmol. 117, 1557–1558.
- Trager F.* (2007) Handbook of lasers and optics. Springer.
- Walsh J.T., Deutsh T.F.* (1991) Measurement of Er:YAG laser ablation plume dynamics. Appl. Phys. B. 52, 217–224.

Yoon G. i in. (1987) Development and application of three-dimensional light distribution model for laser irradiated tissue. IEEE J.of Q. E. vol. QE-23, 10.

Zajac A. (1998) Wybrane procesy konwersji energii przy oddziaływaniu ciągłego i impulsowego promieniowania laserowego na tkanki biologiczne. Rozprawa habilitacyjna. Warszawa, WAT.

AGNIESZKA WOLSKA, PIOTR GŁOGOWSKI

**Laser radiation
Documentation of admissible values of the intensity of the physical factor**

A b s t r a c t

Directive 2006/25/EC lists exposure limit values, which are derived from current scientific studies on the influence of laser radiation on biological tissues. Because of the obligation to transpose that directive into Polish legislation it was necessary to compare currently obligatory maximum permissible exposures (MPEs) with the exposure limit values in directive. As differences were found between those values, it was necessary to develop suitable documentation of maximum admissible intensities of laser radiation and to submit it to the Interdepartmental Commission for Maximum Admissible Concentrations and Intensities for Agents Harmful to Health in the Working Environment. The documentation contains an analysis of potential hazards related to the influence of laser radiation on biological tissues, statistics on accidents related to laser radiation, a comparison of MPEs in the Ordinance of Ministry of Economy, Labour and Social Affairs of 29th November 2002 on maximum admissible concentrations and intensities for agents harmful to health in the working environment with the exposure limit values in directive 2006/25/EC, a proposal for new legislation in p. 4 "Laser radiation" in part D of Attachment 2 to the above-mentioned ordinance (new MPEs), grounds for changing the introduction in that ordinance, and the scope of preliminary and periodic medical examinations of workers exposed to laser radiation.