

7. Wyznaczanie poziomu ekspozycji

Wyznaczanie poziomu ekspozycji w przypadku promieniowania nielaserowego jest bardziej złożone niż w przypadku promieniowania laserowego. Wynika to z faktu, że pracownik narażony jest na promieniowanie nielaserowe o pewnym zakresie długości fal, a nie o jednej długości fali, jak ma to miejsce przy promieniowaniu laserowym. Zakres widmowy promieniowania wpływa istotnie na zakres oceny zagrożenia i determinuje rodzaj zagrożeń dla oczu i skóry, które powinny być uwzględnione w ocenie. Rodzaje rozpatrywanych zagrożeń dla zdrowia nielaserowym promieniowaniem optycznym przedstawiono w rozdziale 6.1.1. W ślad za wytypowanymi rodzajami zagrożeń, które powinny być uwzględnione w ocenie, idzie liczba niezbędnych do określenia poziomów ekspozycji ekspozycyjnych części ciała pracownika, które następnie porównuje się z wyznaczonymi wartościami MDE.

Ważne

Porównanie wyznaczonej wartości poziomu ekspozycji (PE) z wartością MDE polega na wyznaczeniu krotności MDE (k), którą wyznacza się ze wzoru:

$$k = \frac{PE}{MDE}$$

W zależności od krotności MDE określa się ryzyko zawodowe ze względu na poziom ekspozycji oraz częstotliwość wykonywania pomiarów, zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych w środowisku pracy* [3].

Uwaga. W poradniku przyjęto następujące kryteria oceny ryzyka ze względu na poziom ekspozycji na nielaserowe promieniowanie optyczne:

- **duże**, jeśli $PE > MDE$
- **średnie**, jeśli $0,7 MDE < PE \leq MDE$
- **małe**, jeśli $PE \leq 0,7 MDE$.

7.1. Kryteria oceny zagrożenia uwzględniane przy wyznaczaniu poziomów ekspozycji na promieniowanie optyczne

W *Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 maja 2010 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z ekspozycją na promieniowanie optyczne* [2] zostały ustalone kryteria oceny zagrożenia zdrowia promieniowaniem optycznym. Podane są w nim wzory do wyznaczania parametrów promieniowania optycznego określających poziomy ekspozycji odnośnie do promieniowania laserowego i nielaserowego.

Ze względu na zróżnicowanie zagrożeń oczu i skóry powodowanych przez poszczególne rodzaje i zakresy promieniowania optycznego (patrz rozdział 6.1.1) kryteria oceny zagrożenia odnoszą się:

- **w przypadku promieniowania nielaserowego** – osobno do promieniowania nadfioletowego oraz do promieniowania widzialnego i podczerwonego z zakresu IRA i IRB,
- **w przypadku promieniowania laserowego** – osobno do poszczególnych długości fal z całego zakresu promieniowania optycznego (w tym również z zakresu IRC).

7.1.1. Nielaserowe promieniowanie optyczne

W przypadku promieniowania nielaserowego zostały określone wzory do wyznaczania poziomów ekspozycji przy poszczególnych zagrożeniach oraz funkcje skuteczności widmowej szkodliwego oddziaływania:

- nadfioletu na skórę i oczy – $S(\lambda)$,
- światła niebieskiego na siatkówkę oka – $B(\lambda)$,
- promieniowania VIS i IRA na siatkówkę oka – $R(\lambda)$.

Ważne

- Wyznaczanie poziomów ekspozycji na nielaserowe promieniowanie optyczne wymaga, w zależności od rozpatrywanego zagrożenia, uwzględnienia odpowiedniego zakresu widmowego, a w niektórych przypadkach – funkcji skuteczności widmowej.
- Stosowanie określonych funkcji skuteczności widmowej modyfikuje parametry widmowego natężenia napromienienia, napromienienia lub luminancji energetycznej w celu uwzględnienia niekorzystnych dla zdrowia skutków, w zależności od długości fali. W przypadku zastosowania funkcji skuteczności widmowej otrzymane parametry nazywa się skutecznymi.

7.1.1.1. Nielaserowe promieniowanie nadfioletowe

W przypadku ekspozycji oczu na nadfiolet wyznacza się dwa parametry charakteryzujące poziom ekspozycji:

- skuteczne napromienienie promieniowaniem z zakresu $180 \div 400$ nm (H_s),
- napromienienie promieniowaniem UVA z zakresu $315 \div 400$ nm (H_{UVA}).

W przypadku ekspozycji skóry na nadfiolet wyznacza się jeden parametr charakteryzujący poziom ekspozycji – skuteczne napromienienie promieniowaniem z zakresu $180 \div 400$ nm.

Przy wyznaczaniu napromienienia nadfioletem przyjmuje się całkowity czas ekspozycji w ciągu zmiany roboczej, bez względu na długość jej trwania.

Najczęściej mierzonym parametrem promieniowania jest natężenie napromieniania, które mnoży się przez całkowity czas ekspozycji (patrz rozdział 6.1.3.1).

Do wyznaczania wartości skutecznej napromienienia promieniowaniem z zakresu $180 \div 400$ nm stosuje się rozkład widmowy względnej skuteczności aktywności promieniowania nadfioletowego $S(\lambda)$ [2, 5] przedstawiony na rysunku 7.1 w pełnej wersji poradnika wydanego przez CIOP-PIB w 2013 r.

Przykład 1. Ocena zagrożenia fotochemicznego nadfioletem

Stanowisko maszynisty wkleśłodrukowego, na którym źródłem promieniowania nadfioletowego jest lampa kontrolna z zainstalowaną świetlówką UVC (254 nm) o mocy 6 W. Ekspozycja pracownika występuje podczas czynności kontroli druków; pracownik jest ekspozycyjnie narażony na promieniowanie nadfioletowe odbite od powierzchni ocenianego papieru.

Dane pomiarowe:

- skuteczne natężenia napromienienia oczu: $E_s = 0,017$ W/m²,
- natężenie napromienienia promieniowaniem UVA: $E_{UVA} = 0,0016$ W/m²,
- całkowity czas ekspozycji: $t_c = 3\ 650$ s.

Określenie zagrożenia fotochemicznego rogówki i spojówki oczu:

Wartość MDE dla zagrożenia fotochemicznego rogówki i spojówki oczu wynosi: **30 J/m²**.

Poziom ekspozycji: $H_s = E_s \cdot t_c = 0,017$ W/m² · 3650 s = **62,05 J/m²**.

krotność MDE: $k = 62,05 / 30 = 2,07$

Wniosek:

<p>Występuje duże ryzyko zawodowe ze względu na zagrożenie rogówki i spojówki oczu promieniowaniem UV.</p> <p>Określenie dozwolonego czasu ekspozycji:</p> $t_{\text{doz}} = \frac{30}{E_s} = \frac{30}{0,017} = 1764 \text{ s}$
<p>Określenie zagrożenia fotochemicznego soczewki oczu:</p> <p>Wartość MDE dla zagrożenia fotochemicznego soczewki oczu wynosi: 10 000 J/m².</p> <p>Poziom ekspozycji: $H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} \cdot t_c = 0,0016 \text{ W/m}^2 \cdot 3650 \text{ s} = \mathbf{5,84 \text{ J/m}^2}$.</p> <p>krotność MDE: $k = 5,84 / 10\,000 = 0,000584$</p> <p>Wniosek:</p> <p>Występuje małe ryzyko zawodowe ze względu na zagrożenie soczewki oczu promieniowaniem UVA.</p>
<p>Określenie dozwolonego czasu ekspozycji:</p> $t_{\text{doz}} = \frac{10000}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10000}{0,0016} = 6\,250\,000 \text{ s} > 8 \text{ h}$
<p>Wnioski:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Na badanym stanowisku występuje zagrożenie fotochemiczne rogówki i spojówki oczu promieniowaniem UV, przy wyznaczonym z pomiarów czasie całkowitej ekspozycji. • Na badanym stanowisku nie wystąpi zagrożenie fotochemiczne rogówki i spojówki oczu, jeśli czas ekspozycji nie przekroczy 1 764 s w ciągu zmiany roboczej. • Jeśli nie jest możliwe ograniczenie czasu ekspozycji, wówczas pracownik powinien być wyposażony w odpowiednie okulary ochronne. • Na badanym stanowisku nie wystąpi zagrożenie fotochemiczne soczewki oczu promieniowaniem UVA, bez względu na czas ekspozycji w ciągu zmiany roboczej.
<p>Uwaga</p> <p>W przytoczonym przykładzie wartość zmierzona natężenia napromienienia promieniowaniem UVA jest mniejsza niż 0,347 W/m² ($E_{\text{UVA}} < 0,347 \text{ W/m}^2$). Wartość 0,347 W/m² jest wartością graniczną dla 8 h ekspozycji (patrz rozdział 6.1.3.2), wobec czego, bez konieczności wyznaczania dozwolonego czasu ekspozycji, można stwierdzić, że w tym przypadku nie wystąpi przekroczenie wartości MDE.</p>

7.1.1.2. Nielaserowe promieniowanie widzialne i podczerwone

W przypadku ekspozycji **oczu** na promieniowanie widzialne i podczerwone wyznacza się 3 parametry w zależności od rozkładu widmowego emitowanego przez dane źródło.

Jeśli źródło emituje promieniowanie widzialne i podczerwień, to w zależności od kąta widzenia źródła α i czasu ekspozycji, wyznacza się następujące parametry charakteryzujące poziom ekspozycji oczu:

- skuteczne natężenie napromienienia (E_B) lub skuteczną luminancję energetyczną (L_B) promieniowaniem z zakresu 300 ÷ 700 nm (światło niebieskie); do wyznaczania wartości skutecznych uwzględnia się rozkład widmowy względnej skuteczności uszkodzenia fotochemicznego siatkówki oka $B(\lambda)$ [2, 4]
- skuteczną luminancję energetyczną (L_R) promieniowaniem z zakresu 380 ÷ 1400 nm (VIS i IRA); do wyznaczania wartości skutecznych uwzględnia się rozkład widmowy względnej skuteczności uszkodzenia termicznego siatkówki oka $R(\lambda)$ [2, 4]
- natężenie napromienienia (E_{IR}) promieniowaniem z zakresu 780 ÷ 3000 nm.

W przypadku ekspozycji **skóry** na promieniowanie widzialne i podczerwone wyznacza się jeden parametr charakteryzujący poziom ekspozycji – napromienienie ($H_{\text{skóra}}$) promieniowaniem z zakresu 380 ÷ 3000 nm. Ten poziom ekspozycji wyznacza się, **gdy czas jednorazowej ekspozycji nie przekracza 10 s**.

Przykłady oceny: zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka, zagrożenia termicznego siatkówki oka (silny bodziec świetlny), zagrożenia termicznego rogówki i soczewki oka przedstawiono w pełnej wersji poradnika wydanego przez CIOP-PIB w 2013 r.

7.1.1.3. Nielaserowe promieniowanie podczerwone

Jeśli źródło emituje podczerwień (bez silnego bodźca świetlnego, tj. luminancja świetlna źródła $L < 10\ 000\ \text{cd/m}^2$), to w zależności od kąta widzenia źródła α i czasu jednorazowej ekspozycji wyznacza się następujące parametry charakteryzujące poziom ekspozycji oczu:

- skuteczną luminancję energetyczną (L_R) promieniowaniem z zakresu $780 \div 1400\ \text{nm}$ (IRA); do wyznaczania wartości skutecznych uwzględnienia się rozkład widmowy względnej skuteczności uszkodzenia fotochemicznego siatkówki oka $R(\lambda)$ [2, 4] – rysunek 7.2 (przykład 5.),
- natężenie napromienienia (E_{IR}) promieniowaniem z zakresu $780 \div 3\ 000\ \text{nm}$.

W przypadku ekspozycji **skóry** na promieniowanie podczerwone wyznacza się jeden parametr charakteryzujący poziom ekspozycji – napromienienie ($H_{skóra}$) promieniowaniem z zakresu $780 \div 3\ 000\ \text{nm}$. Ten poziom ekspozycji wyznacza się, **gdy czas jednorazowej ekspozycji nie przekracza 10 s.**

Przykłady oceny: zagrożenia termicznego siatkówki oka (słaby bodziec świetlny), zagrożenia termicznego skóry przedstawiono w pełnej wersji poradnika wydanego przez CIOP-PIB w 2013 r.

7.1.2. Promieniowanie laserowe

Poziomy ekspozycji wyznaczane dla promieniowania laserowego wyrażane są natężeniem napromienienia lub napromienieniem promieniowaniem o danej długości fali emitowanej przez urządzenie laserowe. Przy ich wyznaczaniu nie ma potrzeby uwzględniania funkcji skuteczności widmowej, gdyż cała energia / moc promieniowania jest emitowana przez promieniowanie o jednej długości fali. Wartość poziomu ekspozycji porównuje się bezpośrednio z odpowiadającą danej długości fali wartością MDE. Wartość MDE wyznacza się zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale 6.2.

Sposób wyznaczania poziomów ekspozycji na podstawie pomiarów mocy / energii promieniowania lub danych urządzenia laserowego jest dość skomplikowana i zaleca się, aby wykonywała je osoba do tego przygotowana merytorycznie. W przewodniku UE [1] znajduje się tabela, w której zestawiono wyniki obliczeń maksymalnej mocy przenikającej przez aperturę ograniczającą zanim zostanie przekroczona wartość MDE dla ekspozycji oka. Obliczenia wykonano dla różnych długości fal z całego zakresu promieniowania optycznego, przyjmując graniczne czasy ekspozycji i tryb pracy ciągłej lasera.

7.2. Wyznaczanie luminancji energetycznej na podstawie pomiaru natężenia napromienienia

W przypadku, gdy nie ma możliwości zmierzenia luminancji energetycznej (L_e) w danym zakresie widmowym, można ją wyznaczyć na podstawie pomiaru natężenia napromienienia (E_e) promieniowaniem z tego zakresu. Aby to wykonać, niezbędne jest określenie kąta bryłowego (ω), w jakim widziana jest powierzchnia źródła.

Powierzchnia źródła – A_{\downarrow} <i>(w przypadku, gdy źródło jest obserwowane prostopadle do jego powierzchni)</i>
<ul style="list-style-type: none"> równa polu powierzchni źródła (np. koła – w przypadku źródeł okrągłych, prostokąta – w przypadku źródeł prostokątnych).
Powierzchnia widoczna źródła – A_{ϑ} (tzw. pozorna powierzchnia świecąca źródła) <i>(w przypadku, gdy źródło jest obserwowane pod kątem ϑ względem prostopadłej do jego powierzchni)</i>
$A_{\vartheta} = A_{\downarrow} \cdot \cos\vartheta$
ϑ – kąt linii obserwacji źródła, przedstawiony na rys. 6.1.
Obliczanie kąta bryłowego ω (na podstawie [1])
$\omega = \frac{A}{r^2}$ w steradianach (sr)
A – powierzchnia źródła (w zależności od kąta ϑ będzie to A_{\downarrow} lub A_{ϑ}), r – odległość oka (detektora) od źródła.
Uwaga
Jest to metoda uproszczona, przedstawiona w poradniku UE [1]. Zgodnie z normą [4] w przypadku źródeł o kształcie powierzchni innej niż kołowa, powierzchnię A wylicza się w inny sposób. Przyjmuje się założenie, że jest to źródło o powierzchni kołowej, którego pole powierzchni jest równe polu powierzchni danego źródła. Oba sposoby wyznaczania kąta ω są dozwolone.
Obliczanie luminancji energetycznej, w $W/(m^2 sr)$
$L_e = \frac{E_e}{\omega}$
E_e – zmierzone natężenie napromienienia w danym zakresie widmowym, w W/m^2 .

Przykład wyznaczania luminancji energetycznej na podstawie pomiarów natężenia napromienienia przedstawiono w pełnej wersji poradnika wydanego przez CIOP-PIB w 2013 r.

.3. Przeliczenie natężenia napromienienia przy różnych odległościach od źródła

Wyznaczenie wartości natężenia napromienienia przy innych, niż zmierzone, odległościach przebywania pracownika od źródła może być przydatne w sytuacjach, gdy:

- wskazane jest ograniczenie poziomu ekspozycji i możliwe jest oddalenie pracownika od źródła,
- wystąpiła zmiana usytuowania pracownika względem źródła.

W tym celu można zastosować fotometryczne prawo odległości.

Fotometryczne prawo odległości dla źródeł punktowych

W przypadku **źródeł punktowych** natężenie napromienienia w danym punkcie powierzchni (E) jest wprost proporcjonalne do natężenia promieniowania wysyłanego przez źródło w kierunku tego punktu (I_e) i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między źródłem a tym punktem (r):

$$E = \frac{I_e}{r^2}$$

Uwaga: źródło uznajemy za punktowe, gdy odległość eksponowanej tkanki od źródła jest co najmniej 5-krotnie większa od największego wymiaru źródła ($r \geq 5d$).

Prawo to można wyrazić również wzorem:

$$E_1 \cdot r_1^2 = E_2 \cdot r_2^2$$

gdzie:

E_1 – natężenie napromienienia w odległości r_1 ,

E_2 – natężenie napromienienia w odległości r_2 .

Informacje dotyczące fotometrycznego prawa odległości dla źródeł rozciągniętych oraz przykłady obliczeniowe zawiera pełna wersja poradnika wydana przez CIOP-PIB w 2013 r.

Ważne

Dysponując danymi pomiarowymi poziomu natężenia napromienienia przy określonej geometrii pomiarowej (odległość pomiaru, położenia oka obserwatora względem powierzchni źródła), wymiarami geometrycznymi źródła oraz czasem ekspozycji, można wyznaczać:

- natężenie napromienienia przy innych odległościach pracownika,
- dozwolone czasy ekspozycji przy danej wartości poziomu promieniowania,
- luminancję energetyczną na podstawie pomiaru natężenia napromienienia.

Uwaga:

Więcej informacji na omawiany w tym rozdziale temat można znaleźć w pełnej wersji poradnika wydanej przez CIOP-PIB w 2013 r.

Literatura

1. Komisja Europejska: *Niewiązący przewodnik dobrej praktyki wdrażania dyrektywy 2006/25/WE (sztuczne promieniowanie optyczne)*
<http://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=738&langId=en&pubId=5926&type=2&furtherPubs=no>
2. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 maja 2010 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z ekspozycją na promieniowanie optyczne. DzU 2010, nr 100, poz. 643; 2012, poz. 787.
3. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2011, nr 33, poz. 166.
4. PN-T-05687:2002 *Ochrona przed promieniowaniem optycznym. Metody pomiaru promieniowania widzialnego i podczerwonego na stanowiskach pracy.*
5. PN-T-06589:2002 *Ochrona przed promieniowaniem optycznym. Metody pomiaru promieniowania nadfioletowego na stanowiskach pracy.*