

Metody badania nielaserowego promieniowania optycznego

Andrzej Pawlak

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa

Streszczenie: W artykule omówiono wymagania dotyczące metody i zakresu badania nielaserowego promieniowania optycznego na stanowiskach pracy oraz stosowanej aparatury pomiarowej, bazując na zapisach zawartych w aktualnych normach z zakresu promieniowania optycznego. Zakres pomiarów ekspozycji przedstawiono w powiązaniu z aktualnymi wartościami MDE. Zaprezentowano także sposób wyznaczania wymiaru kąтового źródła promieniowania α oraz metodę obliczania skutecznej luminancji energetycznej źródła na podstawie zmierzonego skutecznego natężenia napromienienia. Na zakończenie przedstawiono wymagania dotyczące częstotliwości wykonywania badań oraz propozycje dotyczące zawartości raportu z badań.

Słowa kluczowe: promieniowanie optyczne: nadfioletowe, widzialne, podczerwone, natężenie napromienienia, luminancja energetyczna

1. Wprowadzenie

Promieniowanie optyczne występuje jako naturalny składnik promieniowania słonecznego oraz wytwarzane jest w sposób sztuczny przez człowieka i wykorzystywane w różnych procesach technologicznych, medycynie, kosmetyce oraz pracach badawczych. Promieniowanie to stanowi również produkt uboczny działalności zawodowej człowieka i występuje m.in. podczas spawania lub podczas gorących procesów technologicznych, np. w hutnictwie. Może stanowić zagrożenie dla oczu i skóry pracowników, jeśli nadmierna ilość tego promieniowania pada na ekspozowane tkanki pracownika. Ten fakt uwzględnia Dyrektywa 2006/25/WE [1] oraz rozporządzenia ją wdrażające [2–4], z których wynika konieczność oceny narażenia pracowników na promieniowanie optyczne. Natomiast do określenia stopnia zagrożenia pracowników tym promieniowaniem niezbędne jest wykonanie odpowiednich pomiarów, których ogólne zasady przedstawione są odpowiednio w normach: PN-T-06589: 2002 [5] oraz PN-T-05687: 2002 [6]. Natomiast szczegółowe informacje odnośnie metod pomiaru i oceny ekspozycji pracowników na promieniowanie optyczne zamieszczono w normach PN-EN 14255-1: 2010 [7] oraz PN-EN 14255-2: 2010 [8].

2. Wymagania dotyczące pomiarów nielaserowego promieniowania optycznego

W normach [7, 8] przedstawiono procedurę ogólną oceny ekspozycji na promieniowanie optyczne oraz metody wyznaczania poszczególnych parametrów promieniowania optycznego. W normach tych nie określono wartości MDE – maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji na promieniowanie UV oraz VIS czy IR. Podano długości fal promieniowania nadfioletowego (180–400 nm), promieniowania widzialnego i podczerwonego (380–3000 nm) oraz zagrożenia światłem niebieskim (300–700 nm) [12].

2.1. Procedura ogólna [7, 8]

W celu wykonania pomiarów służących do oceny ekspozycji na promieniowanie optyczne na stanowisku pracy oraz porównania ich z maksymalnymi wartościami dopuszczalnych ekspozycji, które są zawarte w Rozporządzeniu [3], należy wykonać następujące czynności:

- przegląd wstępny, który ma na celu stwierdzenie czy jest, lub czy nie jest konieczne wykonanie pomiarów. Na podstawie dostępnej informacji dotyczącej źródła promieniowania i możliwej ekspozycji pracowników na promieniowanie optyczne należy zdecydować, czy pomiar ekspozycji jest niezbędny, lub czy można stwierdzić (bez wykonywania pomiarów) wystąpienie przekroczenia lub brak przekroczenia wartości MDE. Przy podjęciu powyższej decyzji mogą być przydatne informacje dotyczące klasyfikacji maszyn (kategoria emisji) określonej na podstawie norm [9 lub 10], lub grupa ryzyka dla lamp i systemów lampowych określona na podstawie normy [11];
- analizę zadania roboczego polegającą na określeniu:
 - liczby, rodzaju i umiejscowienia źródeł promieniowania,
 - możliwości występowania promieniowania odbitego lub rozproszonego na ścianach, materiałach, urządzeniach itp.,
 - widma promieniowania – na podstawie danych producenta (należy pamiętać, że może ono być zmienione przez rozproszenie, odbicie lub pochłanianie),
 - odległości pracownika od źródła promieniowania,
 - czasów ekspozycji (jednorazowych i całkowitych),
 - potencjalnych skutków zdrowotnych,
 - wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji,
 - stosowania sprzętu ochrony indywidualnej/zbiorowej;

- pomiar ekspozycji – należy go wyznaczyć w odniesieniu do ustalonych wartości MDE.

2.2. Metoda pomiaru promieniowania nadfioletowego na stanowiskach pracy

Pomiarowi podlegają dwie wielkości: całkowite (nieselektywne) oraz skuteczne natężenie napromienienia. Wyznaczane są one w celu określenia:

- zagrożenia fotochemicznego oka (rogówka, spojówka, soczewka) i skóry nadfioletem z zakresu 180–400 nm; w tym celu wykonuje się:
 - pomiar skutecznego natężenia napromienienia E_s za pomocą radiometru szerokopasmowego o czułości widmowej detektora dopasowanej do krzywej skuteczności widmowej $S(\lambda)$ (tab. 1 w normie [5]),
 - pomiar czasu jednorazowej ekspozycji,
 - wyznaczenie całkowitego czasu ekspozycji,
 - wyznaczenie skutecznego napromienienia H_s ,
- zagrożenia fotochemicznego oka (soczewka) nadfioletem z zakresu UV-A (315–400 nm); w tym celu wykonuje się:
 - pomiar natężenia napromienienia E_c za pomocą radiometru szerokopasmowego o stałej czułości widmowej detektora w zakresie 315–400 nm,
 - pomiar czasu jednorazowej ekspozycji,
 - wyznaczenie całkowitego czasu ekspozycji,
 - wyznaczenie napromienienia H_{UVA} .

Następnie dla obu przypadków należy wyznaczyć stopień zagrożenia oraz dozwolony czas napromienienia. Stopień zagrożenia jest sumą wszystkich wartości napromienienia skóry i oczu w ciągu całej zmiany roboczej oraz sumą napromienienia nieselektywnego oczu. Dozwolony czas napromienienia jest to iloraz wartości MDE dla oczu z zakresu 315–400 nm do wartości natężenia napromienienia zmierzonego lub iloraz wartości MDE dla oczu i skóry z zakresu 180–400 nm do wartości zmierzonego skutecznego natężenia napromienienia.

Pomiaru maksymalnego natężenia napromienienia narażonych części ciała dokonuje się w miejscu przebywania pracownika. W przypadku określenia narażenia skóry należy wykonać pomiar E_s , natomiast oczu – pomiar E_s i E_c . Niezbędne jest również wyznaczenie całkowitego czasu ekspozycji.

2.3. Pomiar promieniowania widzialnego i podczerwonego na stanowiskach pracy

Pomiarowi podlegają następujące wielkości: całkowite (nieselektywne) i skuteczne natężenie napromienienia oraz skuteczna luminancja energetyczna (radiancja). Wyznaczane są one w celu określenia:

- zagrożenia fotochemicznego oka (siatkówki) światłem niebieskim (300–700 nm). W tym celu wykonuje się:
 - pomiar skutecznej luminancji energetycznej (radiancji) L_B za pomocą radiometru szerokopasmowego wywzorcowanego w jednostkach L_B [$W/(m^2sr)$] z detektorem, którego czułość widmowa dopasowana jest do krzywej skuteczności widmowej $B(\lambda)$ (tab. 1 w normie [6]);
 - pomiar natężenia napromienienia E_B za pomocą radiometru szerokopasmowego wywzorcowanego w jednostkach E_B [W/m^2] z detektorem, którego czułość widmowa dopasowana jest do krzywej skuteczności widmowej $B(\lambda)$ (tab. 1 w normie [6]);

Wybór mierzonej wielkości – skutecznej luminancji energetycznej lub natężenia napromienienia uzależniony jest od wartości kąta widzenia źródła, który wyznacza się dla obu przypadków. Ponadto, w obu przypadkach mierzy się czas jednorazowej ekspozycji t_i oraz wyznacza całkowity czas ekspozycji t_c .

- zagrożenia termicznego siatkówki promieniowaniem widzialnym i podczerwonym (380–1400 nm). W tym celu wykonuje się:
 - pomiar skutecznej luminancji energetycznej (radiancji) L_R za pomocą radiometru szerokopasmowego wywzorcowanego w jednostkach L_R [$W/(m^2sr)$] z detektorem, którego czułość widmowa dopasowana jest do krzywej skuteczności widmowej $R(\lambda)$ (tab. 1 w normie [6]),
 - pomiar czasu jednorazowej ekspozycji t_p ,
 - wyznaczenie kąta widzenia źródła;
- zagrożenia termicznego siatkówki promieniowaniem podczerwonym z zakresu IR-A (780–1400 nm); w tym celu wykonuje się:
 - pomiar skutecznej luminancji energetycznej (radiancji) L_R za pomocą radiometru szerokopasmowego wywzorcowanego w jednostkach L_R [$W/(m^2sr)$] z detektorem, którego czułość widmowa dopasowana jest do krzywej skuteczności widmowej $R(\lambda)$ (tab. 1 w normie [6]),
 - pomiar czasu jednorazowej ekspozycji t_p ,
 - wyznaczenie kąta widzenia źródła;
- zagrożenia termicznego oka (rogówka, soczewka) promieniowaniem podczerwonym (780–3000 nm); w tym celu wykonuje się:
 - pomiar natężenia napromienienia E za pomocą radiometru szerokopasmowego wywzorcowanego w jednostkach E [W/m^2] z detektorem o stałej czułości widmowej w zakresie 780–3000 nm,
 - pomiar czasu jednorazowej ekspozycji t_p ;
- zagrożenia termicznego skóry promieniowaniem widzialnym i podczerwonym (IR-A, IR-B) (380–3000 nm). W tym celu wykonuje się:
 - pomiar natężenia napromienienia E za pomocą radiometru szerokopasmowego wywzorcowanego w jednostkach E [W/m^2] z detektorem o stałej czułości widmowej w zakresie 380–3000 nm,
 - pomiar czasu jednorazowej ekspozycji t_p ,
 - wyznaczenie napromienienia $H_{skóra}$ ze wzoru

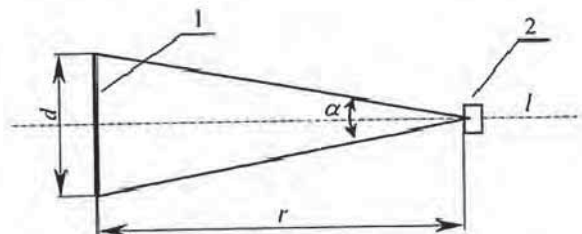
$$H_{skóra} = E \cdot t_i \quad [J \cdot m^{-2}] \quad (1)$$

Pomiar natężenia napromienienia należy wykonać w miejscu przebywania pracownika na wysokości oczu lub skóry. Natomiast luminancję energetyczną należy mierzyć tylko na wysokości oczu pracownika również w miejscu przebywania pracownika. W trakcie wykonywania pomiarów powierzchnię czynną sondy pomiarowej należy skierować w kierunku źródła, zgodnie z osią l (rys. 1). W przypadku źródeł rozciągniętych należy znaleźć takie położenie sondy, przy którym wskazania miernika są największe. W każdym miejscu pomiarowym należy wykonać co najmniej pięć pomiarów.

Niezbędne jest również wyznaczenie czasu jednorazowej oraz całkowitej ekspozycji przez wykonanie pomiaru lub skorzysta-

nie z danych dotyczących procesu technologicznego realizowanego na badanym stanowisku pracy.

W przypadku braku sondy pomiarowej przeznaczonej do pomiaru skutecznej luminancji energetycznej źródła L_s można wyznaczyć tę wielkość na podstawie zmierzonego skutecznego natężenia napromienienia E_s . W tym celu należy zmierzyć lub odczytać z dokumentacji technicznej powierzchnię źródła promieniowania ($S_{\text{ŹRÓDŁA}}$) i porównać ją z powierzchnią koła, a następnie wyznaczyć średnicę d koła ze wzoru



Rys. 1. Układ pomiarowy [6]; 1 – źródło promieniowania, 2 – sonda pomiarowa, l – oś przechodząca przez środek sondy pomiarowej i prostopadła do jej powierzchni, r – odległość sondy pomiarowej od źródła, d – średnica koła

Fig. 1. Measurement setup [6]: 1 – radiation source, 2 – measurement probe, l – axis passing through the middle of the measurement probe and perpendicular to its surface, r – distance between the measurement probe and the radiation source, d – circle diameter

$$S_{\text{ŹRÓDŁA}} = S_{\text{KOŁA}} = \pi \cdot d^2/4 \quad (2)$$

Następnie należy zmierzyć odległość oczu pracownika od źródła – r . Poszukiwana wartość luminancji energetycznej źródła L_s wyznaczana jest ze wzoru

$$L_s = E_s/A \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}], \quad (3)$$

gdzie A jest to kąt przestrzenny wyrażony wzorem

$$A = \alpha^2 \cdot \pi/4 \quad [\text{sr}], \quad (4)$$

gdzie α wymiar kątowy źródła promieniowania wyrażony wzorem

$$\alpha = d/r. \quad (5)$$

3. Uwagi dotyczące metod pomiaru

Niepewność wykonywanych pomiarów, rozszerzona względna dla $k = 2$, nie powinna przekraczać 30 % na poziomie ufności 95 % dla pomiarów, których wyniki porównywane są z wartościami MDE. Przy pomiarach natężenia napromienienia i napromienienia odpowiedź kątowa przy kątach widzenia z zakresu $\pm 60^\circ$ powinna zgadzać się z funkcją cosinusa w granicach $\pm 5\%$. Podczas wykonywania pomiarów należy uwzględnić warunki środowiskowe, które mogą mieć wpływ na wynik pomiarów (np. temperatura, wilgotność, zapylenie, pole elektromagnetyczne itp.). Aparatura pomiarowa powinna być wzorcowana. Geometrię pomiaru należy ustalić przez usytuowanie detektora blisko eksponowanych części ciała przy typowych ich położeniach i nakierowanie go na maksimum promieniowania. W przypadku wykonywania pomiarów luminancji energetycznej (radiancji) lub

natężenia napromienienia światłem niebieskim należy wyznaczyć rzeczywistą średnicę źródła promieniowania D (jest to średnica koła, gdy źródło jest kołowe, lub średnia arytmetyczna najdłuższego i najkrótszego wymiaru, jeżeli źródło jest podłużne), odległość źródła promieniowania od narażonej części ciała pracownika r oraz kąt widzenia ϕ (określany jako kąt między normalną do źródła i linią widzenia). W przypadku, gdy źródło promieniowania nie znajduje się na wprost np. twarzy pracownika, wówczas należy wyznaczyć widzianą średnicę źródła

$$D_L = D \cos \phi. \quad (6)$$

Ponadto należy obliczyć wymiar kątowy źródła promieniowania α ze wzoru

$$\alpha = D_L/r. \quad (7)$$

Istotną kwestią jest prawidłowe wyznaczenie czasu pomiaru. W przypadku występowania stałego promieniowania jest on nieokreślony. Gdy występuje promieniowanie o regularnej zmienności należy przyjąć do pomiarów np. 10 okresów zmienności. Jeżeli badane promieniowanie ma przypadkowe zmiany, wówczas należy przyjąć czas pomiaru wystarczająco długi, np. jedna zmiana robocza. Ponadto podczas wykonywania pomiarów należy zagwarantować bezpieczeństwo osobom wykonującym pomiar poprzez zapewnienie – jeśli jest to konieczne – odpowiednich środków ochrony osobistej [12].

Ponadto w przypadku, gdy istnieją na stanowisku pracy zbiorowe środki ochrony – pomiary należy wykonać w warunkach ich stosowania. Jeżeli pracownik stosuje środki ochrony osobistej, pomiary należy wykonać bez tych środków, a następnie wyznaczyć ich współczynnik tłumienia, tj. wyznaczyć na podstawie pomiarów stosunek natężenia napromienienia bez ochrony do natężenia napromienienia za ochroną [2].

4. Przygotowanie raportu z badań

Raport sporządzony po każdym pomiarze i ocenie ekspozycji powinien zawierać co najmniej:

- datę wykonania pomiarów,
- opis obiektów pomiarowych,
- analizę zadania roboczego,
- fotografie lub schematyczne szkice stanowiska pracy i umiejscowienia punktów pomiarowych,
- opis stosowanej aparatury pomiarowej (typ, numer identyfikacyjny),
- opis metody pomiarów,
- zastosowane wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE),
- przedstawienie wyników pomiarów:
 - w wielkościach i jednostkach MDE,
 - oddzielnie dla różnych części ciała,
 - w przypadku, gdy pracownicy zmieniają położenie lub czynności w trakcie zmiany roboczej całkowite napromienienie w ciągu zmiany roboczej należy obliczyć jako sumę wszystkich natężeń napromienień ze wszystkich położeni i czynności wykonywanych przez pracownika,
- ocenę ekspozycji – przez porównanie wyniku pomiaru z odpowiednią wartością MDE i stwierdzenie, czy jest ona spełniona czy nie,

- wartość niepewności,
- propozycję polepszenia stanu ekspozycji i bezpieczeństwa pracy - jeśli to konieczne, w przypadku, gdy wartość MDE jest przekroczona, to należy zalecić stosowanie odpowiednich środków ochronnych,
- informację dotyczącą następnego terminu wykonania pomiarów i oceny. Powtórzenie pomiaru i oceny może być konieczne, jeżeli:
 - zmieniono źródło promieniowania lub warunki jego pracy,
 - zmienił się rodzaj pracy,
 - zmienił się czas ekspozycji,
 - zastosowano, lub zaprzestano stosować, lub zmieniono środki ochronne,
 - minął termin wynikający z ustalonej częstotliwości wykonywania pomiarów, określony zgodnie z Rozporządzeniem [4].

Wyznaczone z pomiarów krotności MDE powyżej 0,7 MDE wskazują na konieczność wykonania kolejnych badań w odstępie co najmniej roku od daty ostatniego pomiaru. Natomiast krotności MDE z przedziału od 0,4 do 0,7 MDE wskazują na konieczność wykonania kolejnych badań w odstępie co najmniej 2 lat od daty ostatniego pomiaru. W przypadku gdy wyznaczone z pomiarów krotności MDE mają wartości poniżej 0,4 wartości MDE, następne pomiary należy wykonać w odstępie dwóch lat od daty ostatniego pomiaru. Jeśli w kolejnych badaniach poziom ekspozycji nie będzie przekraczał 0,4 wartości MDE, wówczas na tych stanowiskach pracy będzie można odstąpić od wykonywania dalszych badań danego rodzaju promieniowania pod warunkiem, że na tym stanowisku nie zostaną wprowadzone zmiany w wyposażeniu technicznym lub warunkach wykonywania pracy [4].

5. Aparatura pomiarowa

Na podstawie przedstawionej w punkcie 2.2 analizy norm [5, 7] dotyczących pomiarów promieniowania nadfioletowego oraz w punkcie 2.3 analizy norm [6 i 8] dotyczących pomiarów promieniowania widzialnego i podczerwonego można stwierdzić, że w celu wykonywania pomiarów wszystkich wymienionych w tych normach parametrów promieniowania optycznego, należy mieć szerokopasmowy radiometr wyposażony w zestaw ośmiu sond pomiarowych odpowiednio dobranych do zakresu promieniowania oraz rozpatrywanego zagrożenia:

- a) skorygowanej do względnej skuteczności widmowej $S(\lambda)$ – do pomiarów skutecznego natężenia napromienienia (E_s) w zakresie fal o długości 180–400 nm,
- b) nieselektywnej – do pomiarów całkowitego natężenia napromienienia (E_c) w zakresie fal o długości 315–400 nm (UV-A),
- c) skorygowanej do względnej skuteczności widmowej wywoływania uszkodzeń fotochemicznych $B(\lambda)$ – do pomiarów skutecznej luminancji energetycznej (radiacja) w zakresie fal o długości 300–700 nm,
- d) skorygowanej do względnej skuteczności widmowej wywoływania uszkodzeń fotochemicznych $B(\lambda)$ – do pomiarów skutecznego natężenia napromienienia w zakresie fal o długości 300–700 nm,
- e) skorygowanej do względnej skuteczności widmowej wywoływania uszkodzeń termicznych $R(\lambda)$ – do pomiarów sku-

tecznej luminancji energetycznej w zakresie fal o długości 380–1400 nm (VIS i IRA),

- f) skorygowanej do względnej skuteczności widmowej wywoływania uszkodzeń termicznych $R(\lambda)$ – do pomiarów skutecznej luminancji energetycznej w zakresie fal o długości 780–1400 nm (IR-A),
- g) nieselektywnej – do pomiarów natężenia napromienienia w zakresie o długości fal 780–3000 nm,
- h) nieselektywnej – do pomiarów natężenia napromienienia w zakresie o długości fal 380–3000 nm.

Szerokopasmowym miernikiem, od niedawna bezpośrednio dostępnym na naszym rynku, jest radiometrem ILT 1700 produkcji International Light – USA (rys. 2).

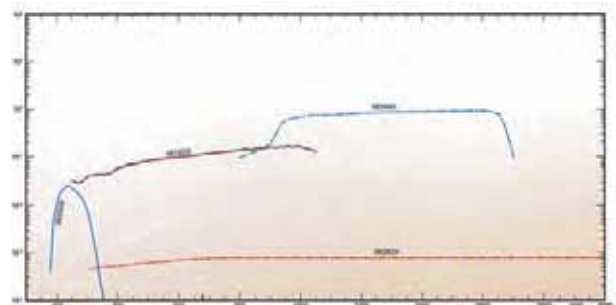
Zaletą tego miernika jest możliwość wyposażenia go w bardzo dużą liczbę sond pomiarowych, które oferuje producent. Spośród tych sond można dobrać takie, za pomocą których będzie można wykonać pomiary prawie wszystkich powyżej wymienionych parametrów promieniowania optycznego. Na rys. 3 przedstawiono zakresy pomiarowe sond przeznaczonych do radiometru ILT 1700, odpowiednie do wymaganych przez rozporządzenie [3].



Rys. 2. Widok miernika ILT 1700 z przykładowymi sondami pomiarowymi [13]

Fig. 2. Photograph of the ILT 1700 meter with the exemplary measurement probes [13]

Poniżej przedstawiono charakterystykę sond pomiarowych przewidzianych do wykonania oceny zagrożenia wymaganej przez rozporządzenie [3].



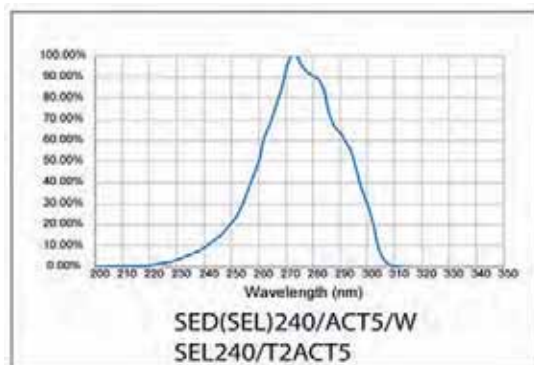
Rys. 3. Zakresy pomiarowe sond przeznaczonych do radiometru ILT 1700 [13]

Fig. 3. Measurement ranges for probes designated for the ILT 1700 radiometer [13]

a) **Pomiar skutecznego natężenia napromienienia (E_s) w zakresie promieniowania nadfioletowego**

Na rys. 4 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 240/ACT5/W. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy: od $5,00e^{-9}$ W/cm² do $2,50e^{-3}$ W/cm²,
- zakres widmowy: 235–307 nm (UV-B i UV-C),
- korekcję $S(\lambda)$,
- dopasowanie kosinusowe.



Rys. 4. Krzywa widmowa sondy SED 240/ACT5/W [13]

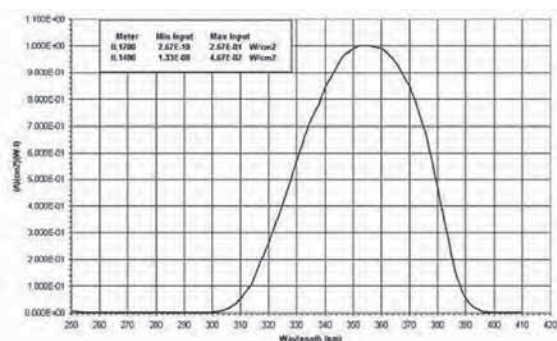
Fig. 4. The probe spectral curve SED 240/ACT5/W [13]

Ze względu na swoje parametry sonda ta jest najbardziej odpowiednią spośród wszystkich sond do wyznaczania zagrożenia fotochemicznego oka (rogówka, spojówka i soczewka) oraz skóry promieniowaniem nadfioletowym.

b) **Pomiar całkowitego natężenia napromienienia (E_e) w zakresie promieniowania nadfioletowego**

Na rys. 5 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 033/UVA/W. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy: od $2,67e^{-10}$ W/cm² do $2,67e^{-1}$ W/cm²,
- zakres widmowy: 315–390 nm (UV-A),
- dopasowanie kosinusowe.

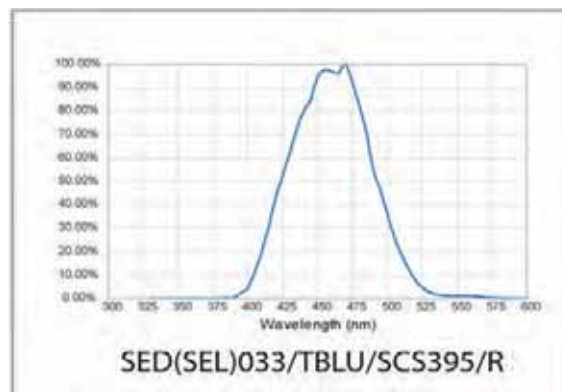


Rys. 5. Krzywa widmowa sondy SED 033/UVA/W [13]

Fig. 5. The probe spectral curve SED 033/UVA/W [13]

Ze względu na swoje parametry sonda ta jest przewidziana przez producenta jako najbardziej odpowiednia do wyznaczania zagrożenia fotochemicznego soczewki oka w zakresie UV-A, chociaż jej charakterystyka nie jest liniowa.

c) **Pomiar skutecznej luminancji energetycznej promieniowania widzialnego (zakres światła niebieskiego)**



Rys. 6. Krzywa widmowa sondy SED 033/TBLU/SCS395/ R [13]

Fig. 6. The probe spectral curve SED 033/TBLU/SCS395/ R [13]

Na rys. 6 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 033/TBLU/SCS395/R. Według danych producenta sonda ta ma:

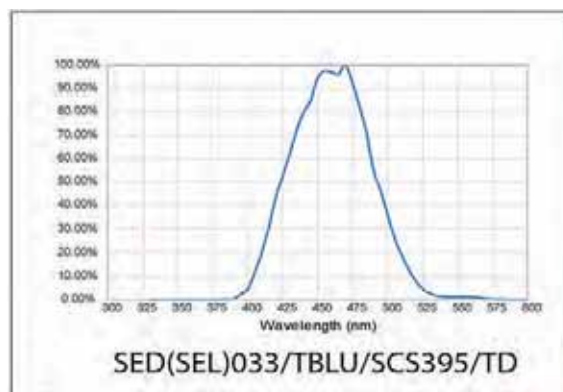
- zakres pomiarowy: $5,56e^{-9}$ W/(cm²/sr) do $5,56e^{+0}$ W/(cm²/sr),
- zakres widmowy: 305–700 nm,
- korekcję $B(\lambda)$,
- dopasowanie kosinusowe,
- kąt widzenia lunety (symbol R) wynoszący 1,5°.

Ze względu na swoje parametry sonda ta jest przewidziana przez producenta jako najbardziej odpowiednia do wyznaczania skutecznej luminancji energetycznej zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka światłem niebieskim.

d) **Pomiar skutecznego natężenia napromienienia promieniowania widzialnego (zakres światła niebieskiego)**

Na rys. 7 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 033/TBLU/SCS395/TD. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy: od $7,41e^{-10}$ W/cm² do $7,41e^{-1}$ W/cm²,
- zakres widmowy: 305–700 nm,
- korekcję $B(\lambda)$,
- dopasowanie kosinusowe.



Rys. 7. Krzywa widmowa sondy SED 033/TBLU/SCS395/TD [13]

Fig. 7. The probe spectral curve SED 033/TBLU/SCS395/TD [13]

Ze względu na swoje parametry sonda ta jest przewidziana przez producenta jako najbardziej odpowiednia do wyznaczania skutecznego natężenia napromienienia zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka światłem niebieskim.

e) **Pomiar skutecznej luminancji energetycznej w zakresie promieniowania widzialnego oraz podczerwonego (zakres IR-A)**

W ofercie firmy International Light nie znaleziono sondy pomiarowej przeznaczonej do pomiarów skutecznej luminancji energetycznej z korekcją $R(\lambda)$ w zakresie 380–1400 nm w celu wyznaczenia zagrożenia termicznego siatkówki oka.

Wyznaczenie tej wartości będzie możliwe dzięki zapisowi zawartemu w normie [8] (p. 7.4.3): „w celu pokrycia całego zakresu może być użyte więcej niż jedno urządzenie pomiarowe”. W związku z tym skuteczną luminancję energetyczną w zakresie 380–1400 nm będzie można wyznaczyć poprzez zsumowanie wyników pomiarów z dwóch sond przewidzianych do oceny:

- skutecznego natężenia napromienienia promieniowania widzialnego (zakres światła niebieskiego) – po przemożeniu wyników przez 10 w celu zmiany jej korekcji z $B(\lambda)$ na $R(\lambda)$,
- skutecznego natężenia napromienienia promieniowania podczerwonego w zakresie IR-A,

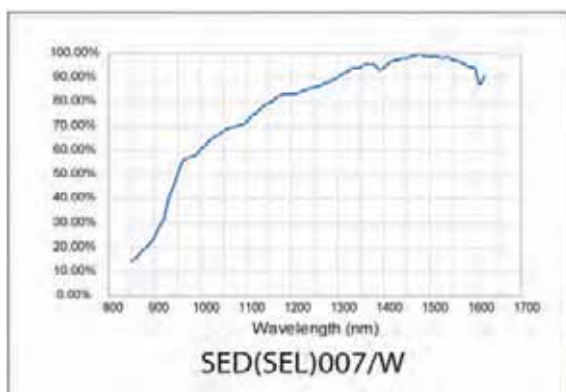
Następnie należy dokonać przeliczenia wartości skutecznego natężenia napromienienia źródła na skuteczną luminancję energetyczną zgodnie z zapisem normy [6] (p. 2.5.5) z wykorzystaniem wzorów: 3, 4 i 5.

f) **Pomiar skutecznej luminancji energetycznej promieniowania podczerwonego w zakresie IR-A**

Firma International Light nie ma w swojej ofercie sondy, za pomocą której można by dokonać pomiaru skutecznej luminancji energetycznej z korekcją $R(\lambda)$ w celu wyznaczenia zagrożenia termicznego siatkówki oka. W związku z tym, zgodnie z zapisem normy PN-T-05687 p. 2.5.5. [6], skuteczną luminancję energetyczną źródła będzie można wyznaczyć na podstawie zmierzonej wartości skutecznego natężenia napromienienia za pomocą sondy SED 007/W i odpowiedniego przeliczenia jej na luminancję. Parametry techniczne tej sondy są najbardziej zbliżone do oceny zagrożenia termicznego siatkówki oka. Według danych producenta są to:

- zakres pomiarowy: $3,57e^{-9}$ W/cm² do $1,25e^{-2}$ W/cm²,
- zakres widmowy: 770–1400 nm,
- korekcja $R(\lambda)$,
- dopasowanie kosinusowe.

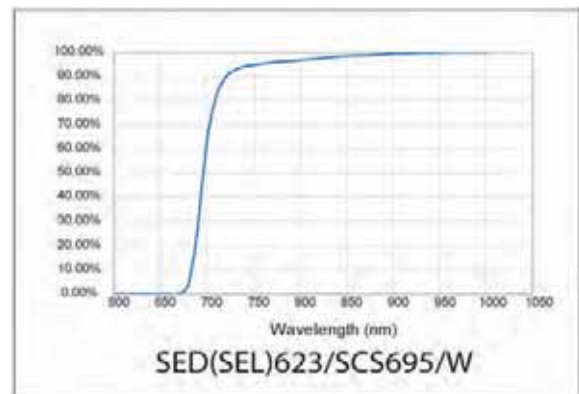
Na rys. 8 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 007/W.



Rys. 8. Krzywa widmowa sondy SED 007/W [13]

Fig. 8. The probe spectral curve SED 007/W [13]

g) **Pomiar natężenia napromienienia promieniowaniem podczerwonym w zakresie IR-A i IR-B**



Rys. 9. Krzywa widmowa sondy SED 623/SCS695/W [13]

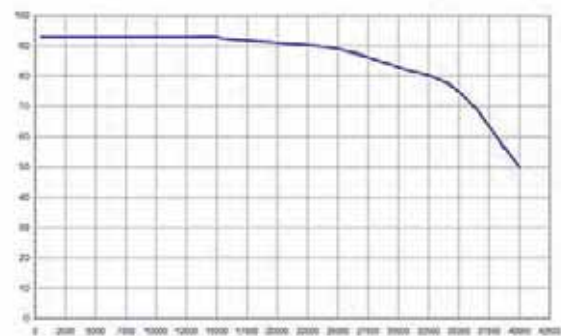
Fig. 9. The probe spectral curve SED 623/SCS695/W [13]

Na rys. 9 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 623/SCS695/W. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy: $8,57e^{-5}$ W/cm² do $9,52e^{-1}$ W/cm²,
- zakres widmowy: 770–3 000 nm,
- dopasowanie kosinusowe.

Ze względu na swoje parametry sonda ta idealnie nadaje się do wyznaczania zagrożenia termicznego oka (rogówka, soczewka).

h) **Pomiar natężenia napromienienia promieniowaniem widzialnym i podczerwonym**



Rys. 10. Krzywa widmowa sondy SED 624/K9 [13]

Fig. 10. The probe spectral curve SED 624/K9 [13]

Na rys. 10 przedstawiono krzywą widmową sondy SED 624/K9. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy: $2,00e^{-5}$ W/cm² do $2,22e^{-1}$ W/cm²,
- zakres widmowy: 200–40 000 nm.

Ze względu na swoje parametry sonda ta jest najbardziej odpowiednią spośród wszystkich sond do wyznaczania zagrożenia termicznego skóry pomimo, że jej zakres pomiarowy osiąga wartość 40 000 nm – zamiast wymaganych w rozporządzeniu [3] 3000 nm. Jednak pomimo tej różnicy w wartości maksymalnego zakresu pomiarowego sonda ta nadaje się do pomiarów służących do oceny zagrożenia skóry, gdyż na stanowiskach przemysłowych w praktyce nie występują długości fal powyżej 3000 nm.

6. Wnioski dotyczące stosowania wymagań pomiarowych zawartych w poszczególnych normach

W przypadku oceny zagrożenia pracowników ze względu na możliwość fotochemicznego uszkodzenia rogówki, spojówki, czy soczewki oka oraz skóry promieniowaniem nadfioletowym należy stosować zapisy dotyczące aparatury pomiarowej oraz sposobu pomiaru zawarte w normie PN-EN 14255-1: 2010 [7]. Gdy źródło promieniowania nadfioletowego promieniuje w zakresie długości fali 180–400 nm wówczas należy, zgodnie z normą [7], stosować sondy pomiarowe skorygowane do względnej skuteczności biologicznej promieniowania nadfioletowego $S(\lambda)$. Natomiast w celu oceny zagrożenia pracowników ze względu na możliwość fotochemicznego uszkodzenia siatkówki oka oraz termicznego uszkodzenia siatkówki, rogówki i soczewki oka oraz skóry promieniowaniem widzialnym i podczerwonym należy stosować wytyczne dotyczące aparatury pomiarowej oraz sposobu pomiaru zawarte w normie PN-EN 14255-2: 2010 [8]. Zgodnie z zapisami tej normy [8], w przypadku oceny zagrożenia pracowników światłem niebieskim (oddziaływanie fotochemiczne na siatkówkę oka) należy stosować sondy pomiarowe skorygowane do względnej skuteczności widmowej wywoływania uszkodzeń fotochemicznych $B(\lambda)$. Natomiast sondy pomiarowe przewidziane do oceny zagrożenia termicznego siatkówki oka muszą być skorygowane do skuteczności widmowej wywoływania uszkodzeń termicznych $R(\lambda)$ [12].

W przypadku braku sondy pomiarowej przeznaczonej do pomiarów skutecznej luminancji energetycznej źródła L_s w celu oceny zagrożenia termicznego siatkówki oka promieniowaniem podczerwonym w normie [6] podana jest bardzo przydatna metoda obliczania tej wielkości na podstawie zmierzonego skutecznego natężenia napromienienia E_s tego promieniowania.

Bibliografia

1. Dyrektywa 2006/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym) (dziewiętnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) (DzU UE nr L 114 z 27.04.2006, s. 38).
2. Rozporządzenia 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 nr 100, poz. 643, ze zm. DzU z 2012 poz. 787).
3. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 lipca 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU nr 141, poz. 950).
4. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU nr 33, poz. 166).
5. PN-T-06589: 2002. Ochrona przed promieniowaniem optycznym – Metody pomiaru promieniowania nadfioletowego na stanowiskach pracy.
6. PN-T-05687: 2002. Ochrona przed promieniowaniem optycznym – Metody pomiaru promieniowania widzialnego i podczerwonego na stanowiskach pracy.
7. PN-EN 14255-1: 2010. Pomiar i ocena ekspozycji osób na niespójne promieniowanie optyczne. Część 1: Promieniowanie nadfioletowe emitowane przez źródła sztuczne na stanowisku pracy.
8. PN-EN 14255-2: 2010. Pomiar i ocena ekspozycji osób na niespójne promieniowanie optyczne. Część 2: Promieniowanie widzialne i podczerwone emitowane przez źródła sztuczne na stanowisku pracy.
9. PN-EN 12198-1+A1: 2010. Maszyny. Bezpieczeństwo. Ocena i zmniejszenie ryzyka wynikającego z promieniowania emitowanego przez maszyny. Część 1: Zasady ogólne.
10. PN-EN 12198-2+A1: 2010. Maszyny. Bezpieczeństwo. Ocena i zmniejszenie ryzyka wynikającego z promieniowania emitowanego przez maszyny. Część 2: Procedury pomiaru emisji promieniowania.
11. PN-EN 62471: 2010. Bezpieczeństwo fotobiologiczne lamp i systemów lampowych.
12. Pawlak A., *Zasady wykonywania pomiarów promieniowania optycznego na stanowiskach pracy*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 255'12.
13. <http://www.intl-lighttech.com>. ■

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowywanego w latach 2011–2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Methods of measurement of coherent radiation

Abstract: This paper presents the requirements for the method and extent of testing of non coherent optical radiation at work places as well as the meters used for tests. The requirements are based on the current standards in the field of optical radiation. The scope of the exposure measurements are presented in conjunction with the current values of MDE. There is a description of the method of determining the angular dimension of radiation source α and how to calculate the effective source radiance from the measured effective irradiance. At the end, the paper presents the recommended frequency of testing and suggestions concerning the content of the study.

Keywords: ultra-violet, visible and infra-red radiation, irradiance, radiance

mgr inż. Andrzej Pawlak

Absolwent Politechniki Warszawskiej – Wydział Elektryczny, specjalizacja: technika świetlna. Obecnie asystent w Pracowni Promieniowania Optycznego CIOP-PIB. Działalność zawodowa to prace badawcze oraz ekspertyzy z zakresu oświetlenia elektrycznego oraz promieniowania optycznego.

e-mail: anpaw@ciop.pl

