

dr inż. GRZEGORZ OWCZAREK

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: growc@ciop.lodz.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0012.0968

Problemy związane z rozpoznawaniem barw świateł sygnalizacyjnych

Fot. Foto-Ruhrgebiet/Bigstockphoto



W artykule przedstawiono główne zagrożenia dla oczu, wywołane nadmierną ekspozycją na promieniowanie optyczne. Omówiono zagadnienie dotyczące widmowej czułości oka w kontekście rozpoznawania barw świateł sygnalizacyjnych. W celu wyjaśnienia efektów mechanizmu zjawisk, odpowiadających za rozpoznawanie barw świateł sygnalizacyjnych przeprowadzono graficzną analizę widmowych rozkładów świateł sygnalizacyjnych emitowanych z tradycyjnych źródeł żarowych oraz źródeł typu LED (*light emitting diode*).

W analizie tej uwzględniono również warunki, w jakich może odbywać się obserwacja świateł sygnalizacyjnych (warunki widzenia dziennego lub nocnego). Wskazano też, w jakim kierunku powinny zmierzać prace, w których badany będzie wpływ warunków obserwacji, czułości widmowej oka (w tym zaburzenia w rozpoznawaniu barw) oraz różnych typów źródeł świateł sygnalizacyjnych na rozpoznawanie barw tych świateł.

Słowa kluczowe: zagrożenia oczu, światła sygnalizacyjne, rozpoznawanie kolorów

Problems with signal lighting colours' recognition

The article presents the main eye hazards caused by excessive eye exposure on optical radiation. The human eye sensitivity spectral distribution in the context of signal colour recognition was discussed. In order to explain the effects of the mechanism of phenomena responsible for the recognition of signal lights colour, a graphical analysis of spectral distributions of signal lights emitted from traditional incandescent sources and LED sources (*light emitting diode*) was performed.

This analysis also takes into account the conditions under which observation of signal lights may take place (daylight and night vision conditions). The conclusions also indicate the further direction of studies on the influence of colour recognition affected by vision conditions, eye sensitivity spectral distribution (including disturbance of colour recognition) and different types of signal light sources.

Keywords: eye hazards, signal lights, colour recognition

Wstęp

Za wszystko, co widzimy, jest odpowiedzialne promieniowanie optyczne, a właściwie pewna jego część, którą nazywamy promieniowaniem widzialnym. Przyjmuje się, że zakres długości fali promieniowania optycznego, które dociera do siatkówki oka (i wnika weń bezpośrednio) zawiera się

w przedziale od ok. 380 do 1400 nm. Efekt wnikania promieniowania optycznego z tego zakresu do oka doskonale obrazuje wykres przedstawiający charakter transmisji oka – od płaszczyzny rogówki do siatkówki – w funkcji długości fali (rys. 1.), [1].

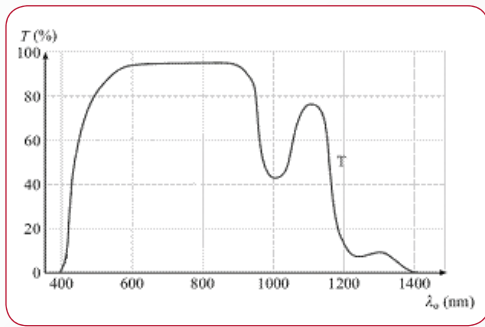
Zakres długości fali promieniowania od 380 do 780 nm to promieniowanie widzialne (*VIS – visible*), a kiedy wartość 780 nm ulega przekroczeniu,

promieniowanie zmienia się w podczerwone (*NIR – near infrared*). Należy zauważyć, że granice oddzielające przedziały dla promieniowania widzialnego i podczerwonego pokrywają się ze sobą. Oznacza to, że fala o wartości długości równej 780 nm jest traktowana zarówno jako należąca do zakresu promieniowania widzialnego, jak i podczerwonego podczas wyliczeń współczynników służących do oceny przepuszczania promieniowania optycznego przez filtry ochronne [2].

Zakres promieniowania widzialnego (czyli o długości fali od 380 do 780 nm) przyjęty jest powszechnie w metodach służących do obliczeń ilościowych (np. do wyliczania wartości współczynnika przepuszczania światła przechodzącego przez filtry optyczne, współczynników przepuszczania świateł sygnalizacyjnych i wielu innych). Jednak w klasyfikacji szkodliwych efektów towarzyszących nadmiernej ekspozycji oka na promieniowanie optyczne, granicę podziału pomiędzy promieniowaniem nadfioletowym (*UV – ultraviolet*) i widzialnym wyznacza długość fali o wartości 400 nm [3].

Nadmierna intensywność promieniowania optycznego, zarówno tego docierającego bezpośrednio do siatkówki, jak również spoza tego zakresu, może być powodem wielu niekorzystnych zmian w oku. Promieniowanie UV-C (o długości fali od 180 do 280 nm) i UV-B (od 280 do 315 nm) może wywoływać zapalne uszkodzenia rogówki. Promieniowanie UV-A (od 180 do 280 nm) jest odpowiedzialne głównie za zaćmę, a promieniowanie *VIS* (od 380 do 780 nm) za fotochemiczne i termiczne uszkodzenie siatkówki. Zaćma oraz oparzenie rogówki mogą być wywołane przez promieniowanie IR-A (od 780 do 1400 nm), a przymglenie rogówki, zaćma i oparzenie rogówki przez promieniowanie IR-B (od 1400 do 3000 nm). Daleka podczerwień IR-C (od 3000 do 1 mm) powoduje głównie zaoparzenia rogówki [3].

Każdy z wymienionych skutków nadmiernej ekspozycji oka na promieniowanie optyczne może mieć lżejsze (chwilowe oślnienie) lub cięższe (oparzenia oka lub zaćma) konsekwencje. Zaćma jest efektem, który w głównej mierze może towarzyszyć ekspozycji na promieniowanie nadfioletowe i podczerwone. Pomimo niewątpliwie ogromnego postępu w dziedzinie chirurgii zmętniałej soczewki (zaćmy), do którego zaliczyć należy zarówno nowoczesne techniki operacyjne (fot. 1.), jak również konstrukcje sztucznych soczewek wewnątrzgałkowych (IOL



Rys. 1. Transmisja oka od płaszczyzny rogówki do siatkówki w funkcji długości fali

Fig. 1. Transmission of the eye from the surface of the cornea to the retina as a function of wavelength

– *intraocular lens*), pozwalających na uzyskanie po operacji dobrej ostrości wzroku, zabieg usunięcia zaćmy związany jest nieuchronnie z wymianą naturalnej soczewki na soczewkę sztuczną, która z uwagi na swoje właściwości może mieć również wpływ na rozpoznawanie barw [4]. Jest to więc jeden z wielu argumentów przemawiających za tym, aby nie lekceważyć zagrożeń oczu wywołanych promieniowaniem optycznym, również w kontekście rozpoznawania barw światła sygnalizacyjnych.

Celem artykułu jest omówienie wpływu warunków obserwacji i czułości oka na rozpoznawanie barw światła sygnalizacyjnych.

Rozpoznawanie barw

To, czy oko będzie w stanie rozróżnić określoną długość fali (barwę), zawierającą się w zakresie przedziału określanego jako widzialny, jest cechą osobniczą i zależy od wrażliwości komórek receptorowych (pręcików lub czopków), rozmieszczonych na siatkówce oka. Wizualizację siatkówki oka z zaznaczeniem pręcików przedstawiono na fot 2.

Proces widzenia ma charakter elektrochemiczny. Kiedy w siatkówce oka komórki receptorowe zostają pobudzone światłem, zmianie ulega chemiczna kompozycja pigmentu w nich zawartego. Powoduje to wygenerowanie przepływu prądu elektrycznego do mózgu poprzez włókna nerwowe [5]. Pręciki charakteryzują się wysoką światłoczułością i nie zawierają barwników, dlatego są odpowiedzialne głównie za wykrywanie kształtu i ruchu i nie biorą udziału w widzeniu barwnym. Czopki są mniej wrażliwe na światło, ale posiadają zdolność rozróżniania barw; umożliwiają również postrzeganie drobnych szczegółów.

Zaburzenia rozpoznawania barw dzielą się na zaburzenia nabyte oraz wrodzone. Zaburzenia wrodzone sklasyfikowane są zgodnie z rodzajem uszkodzonych czopków oraz stopniem ich uszkodzenia. Klasyfikację tę przedstawiono schematycznie na rys. 2.

Zaburzenie rozpoznawania barw jest zazwyczaj wadą wrodzoną, uwarunkowaną genetycznie, dziedziczną recesywnie w sprzężeniu z chromosomem X. Z tego powodu zaburzenia w rozpoznawaniu barw znacznie częściej dotyczą mężczyzn (ok. 8% populacji) niż kobiet (ok. 0,5% populacji), [6].

Możliwość rozpoznawania barw może zostać zakłócona również podczas obserwacji przez filtry barwne, a więc również służące do ochrony oczu



Źródło: archiwum autora

Fot. 1. Zabieg usunięcia zaćmy metodą fakoemulsyfikacji
Photo 1. Cataract removal by phacoemulsification method



Fot. 2. Siatkówka ludzkiego oka wraz z wskazaniem pręcików
Photo 2. Human's eye retina with stamens shown

przed niebezpiecznym promieniowaniem optycznym (stosowane na wielu stanowiskach pracy), jak też przez powszechnie używane okulary przeciwsłoneczne. Zakłócenie rozpoznawania barw podczas patrzenia przez filtry może stanowić znaczącą niedogodność m.in. podczas obserwacji specyficznych procesów technologicznych (np. hutniczych) oraz obserwacji światła sygnalizacyjnych.

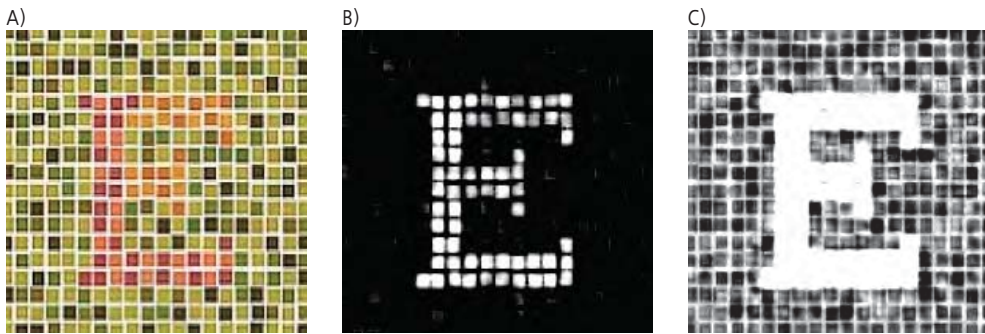
Narzędziem pozwalającym na wizualizację pewnych efektów towarzyszących widzeniu barwnemu w obecności filtrów jest oprogramowanie do obróbki graficznej, określane jako mikser kanałów. Narzędzie to pozwala na zwiększenie lub zmniejszenie nasycenia poszczególnych barw.

Spektakularnym przykładem, pozwalającym na zaobserwowanie zmian w postrzeganiu obra-



Rys. 2. Klasyfikacja zaburzeń wrodzonych rozpoznawania barw
Fig. 2. Classification of congenital disorders of color recognition

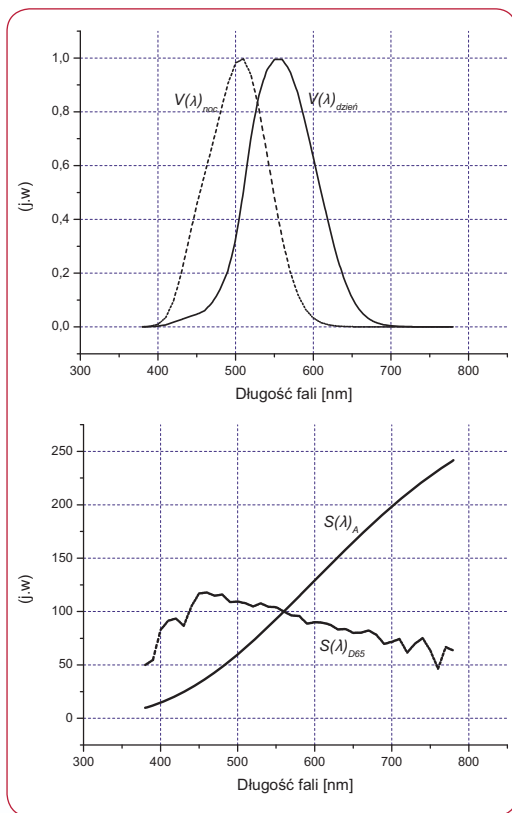
Oprac. autora



Rys. 3. Obraz z tablicy Ishihary przed i po wykonaniu dopasowania: (A) – przed dopasowaniem, (B) – po dopasowaniu (kanały: czerwony: 155,6, zielony: -164,4, niebieski: -19,3), (C) – po dopasowaniu (kanały: czerwony: 191, zielony: -200, niebieski: -34,1), [8]
 Fig. 3. An image from the Ishihara table before and after colour match: (A) – before colour match, (B) – after colour match (channels: red: 155,6, green: -164,4, blue: -19,3), (C) – after colour match (channels: red: 191, green: -200, blue: -34,1), [8]



Fot. 3. Fragment obudowy lasera przemysłowego z zamontowanym elementem do sygnalizacji świetlnej
 Photo 3. An element of the industrial laser housing with the installed element for signal lights



Rys. 4. Rozkłady widmowe czułości oka dotyczące widzenia w warunkach dziennych ($V(\lambda)_{\text{dzień}}$) i nocnych ($V(\lambda)_{\text{noc}}$) oraz rozkłady widmowe iluminatorów D65 ($S(\lambda)_{\text{D65}}$) i A ($S(\lambda)_{\text{A}}$)
 Fig. 4. Spectral visibility function of the average human eye for daylight ($V(\lambda)_{\text{day}}$) and night vision ($V(\lambda)_{\text{night}}$) distribution and Spectral energy distribution for illuminant D65 ($S(\lambda)_{\text{D65}}$) and A ($S(\lambda)_{\text{A}}$)

np. podczas pracy z monitorami komputerów lub oglądania telewizji. Podstawowe parametry obrazu, takie jak jasność, kontrast, nasycenie barw ustawiane są na określonym, standardowym poziomie w taki sposób, aby uzyskać optymalne wrażenia wzrokowe. Pod tym pojęciem kryją się takie obrazy, których jakość – w ocenie obserwatora – jest również optymalna. Praktycznie wszystkie urządzenia powszechnego użytku, których podstawową funkcją jest wyświetlanie obrazów, mają możliwość dopasowania swoich parametrów do indywidualnych potrzeb użytkownika. Korelacja parametrów wyświetlanego na monitorach ekranowych obrazu cyfrowego z jego jakością uzależniona jest również od warunków otoczenia. Obrazy obserwowane w warunkach intensywnego oświetlenia powinny charakteryzować się większym kontrastem i nasyceniem barw.

Zagadnienie związane z dopasowaniem parametrów obrazu do warunków oświetlenia zewnętrznego jest doskonale znane projektantom wszelkiego typu monitorów ekranowych. Współczesne monitory komputerów, smartfony lub ekrany telewizyjne mogą wyświetlać obrazy o zróżnicowanych parametrach, zgodnie z zaprogramowanymi przez producentów trybami wyświetlania, dopasowującymi je do obserwacji np. w warunkach dziennych (przy stosunkowo wysokim poziomie oświetlenia zewnętrznego), jak również w warunkach nocnych. Parametry obrazów wyświetlanych przez monitory ekranowe będące w powszechnym użyciu zmieniają się również w sposób automatyczny, tak aby dopasować obraz do panujących warunków oświetlenia zewnętrznego.

Światła sygnalizacyjne

Wszelkie monitory – zarówno w środowisku pracy, jak i w życiu codziennym – nie pozostawiają wątpliwości, że w przestrzeni, w której żyjemy, dominuje odbiór sygnałów rejestrowanych kanałem wzrokowym. W tej przestrzeni światła sygnalizacyjne stanowią ważny element, wykorzystywany m.in. w systemach regulacji ruchu lądowego, powietrznego i wodnego oraz w szeroko rozumianych systemach ostrzegawczych i alarmowych. Barwa, natężenie oraz charakterystyka świecenia (tryb ciągły lub impulsowy) uzależniona jest od rodzaju i zastosowania światła sygnalizacyjnego. Sygnały emitowane poprzez światła sygnalizacyjne bardzo często są skorelowane z sygnałami emitowanymi dźwiękowo.

Powszechnie znane są sygnalizacyjne światła drogowe o barwie czerwonej, żółtej i zielonej. Barwy te powinny być jednoznacznie rozpoznawalne przez użytkowników dróg, w szczególności przez kierowców. Nie jest to jednak bezwzględnie konieczne, gdyż w przypadku drogowej sygnalizacji świetlnej, światło o barwie czerwonej zawsze umieszczone jest nad żółtym i zielonym. Wymagania w zakresie pełnego rozpoznawania barw są jednak restrykcyjnie egzekwowane w przypadku wielu zawodów, w których sygnalizacja świetlna jest stałym elementem infrastruktury miejsca pracy (węzły kolejowe, porty morskie i rzeczne, lotniska) lub wykonywanych czynności (zawód pilota, marynarza, kierowcy).

W wielu przypadkach barwa światła sygnalizacyjnego powinna być rozpoznawalna również podczas stosowania okularów wyposażonych w barwne filtry optyczne. Przypadek ten dotyczy m.in. kierowców, lotników lub marynarzy, stosujących okulary przeciwsłoneczne, jak również np. operatorów urządzeń laserowych, którzy są zobligowani do używania specjalistycznych okularów chroniących przed promieniowaniem laserowym. Na fot. 3. przedstawiono fragment obudowy lasera przemysłowego z zamontowanym elementem do sygnalizacji świetlnej, emitującej ostrzeżenia o trybie pracy lasera (tzw. wizualne urządzenia ostrzegające).

Rozkłady widmowe czułości oka i iluminantów

Rozkład widmowy czułości oka ($V(\lambda)$) to zależność określająca wartość energii docierającej do oka w funkcji długości fali. Czułość oka jest inna w warunkach dziennych i nocnych. Pojęcie rozkładu widmowego, czyli zależności energii od długości fali promieniowania dotyczy również energii wytwarzanej przez źródło promieniowania optycznego. Rozkład widmowy energii oświetlenia zewnętrznego określany jest jako rozkład widmowy iluminantu ($S(\lambda)$). Standardowo przyjmuje się zwykle dwa rozkłady widmowe iluminantów: D65 (oświetlenie naturalne) lub A (oświetlenie sztuczne).

Na rys. 4. przedstawiono rozkłady widmowe czułości oka w odniesieniu do widzenia w warunkach dziennych ($V(\lambda)_{\text{dzień}}$) i nocnych ($V(\lambda)_{\text{noc}}$), [9] oraz rozkłady widmowe iluminantów D65 ($S(\lambda)_{\text{D65}}$) i A ($S(\lambda)_{\text{A}}$), [10].

Z rozkładów przedstawionych na rys. 4. widać, że na krańcach przedziału długości fali dla

zu przefiltrowanego z wykorzystaniem miksera kanałów, są tablice pseudoizochromatyczne Ishihary, służące do diagnostyki wrodzonych zaburzeń rozpoznawania barw. Omówiony niżej przykład ma również związek z zagadnieniami odnoszącymi się do rozpoznawania światła sygnalizacyjnych, które mogą być także emitowane z ekranu komputera.

Na rys. 3. przedstawiono przykładowy obraz z tablicy Ishihary, przed i po wykonaniu modyfikacji palety barw (zmiany wartości w kanałach: czerwonym, zielonym i niebieskim). Analiza została wykonana z wykorzystaniem oprogramowania graficznego GIMP [7].

Z dopasowaniem parametrów obrazu do indywidualnej wrażliwości oka spotykamy się na co dzień,

promieniowania widzialnego (dla 380 – 400 nm i 700 – 780 nm) czułość oka jest znacząco niższa i spada praktycznie do zera dla krańcowych wartości długości fali.

W celu wyjaśnienia efektów mechanizmu zjawisk odpowiadających za rozpoznawanie barw światła sygnalizacyjnych, autor artykułu przeprowadził graficzną analizę widmowych rozkładów światła sygnalizacyjnych, emitowanych z tradycyjnych źródeł żarowych oraz źródeł typu LED (*light emitting diode*). W analizie tej uwzględniono również warunki, w których może odbywać się obserwacja światła sygnalizacyjnych (warunki widzenia dziennego lub nocnego).

Rozkłady widmowe światła sygnalizacyjnych

Rozpoznawanie barwy światła sygnalizacyjnego w przypadku oka dostrójonego do warunków widzenia dziennego lub nocnego zależy również od rozkładu widmowego samego światła sygnalizacyjnego, który z oczywistych względów różni się od przedstawionych na rys. 4. rozkładów widmowych standardowych iluminantów D65 lub A. Poniżej przedstawiono rozkłady widmowe światła sygnalizacyjnych, przy sporządzeniu których uwzględniono również to, jak zmienia się czułość oka w zależności od warunków widzenia. Są to rozkłady widmowe światła sygnalizacyjnych ważone czułością oka w warunkach dziennych ($E(\lambda) \cdot V(\lambda)_{\text{dzień}}$) i nocnych ($E(\lambda) \cdot V(\lambda)_{\text{noc}}$).

Ważenie rozkładu widmowego innym rozkładem widmowym pozwala na uwzględnienie tego, jaki jest udział energii promieniowania obu rozkładów w stosunku do danej długości fali. W przypadku rozkładów widmowych światła sygnalizacyjnych i rozkładów widmowych określających czułość oka, wynik mnożenia wartości energii promieniowania światła sygnalizacyjnego $E(\lambda)$ i rozkładu widmowego czułości oka $V(\lambda)_{\text{dzień/noc}}$ określa wartość skutecznego promieniowania docierającego do oka (w warunkach dziennych lub nocnych). Otrzymujemy więc informację o efektach oddziaływania tego promieniowania na pręciki i czopki. Z uwagi na różnice w czułości oka w warunkach widzenia dziennego i nocnego, wartości te będą różne w obu przypadkach.

Na rys. 5. przedstawiono rozkłady widmowe światła sygnalizacyjnych, emitowanych ze źródeł LED oraz tradycyjnych źródeł żarowych w odniesieniu do barwy czerwonej. Rozkłady te są stosowane m.in. w ocenie rozpoznawania barw, podczas obserwacji przez filtry używane w okularach przeciwsłonecznych [11] oraz filtry chroniące przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym [2].

Z rozkładów przedstawionych na rys. 5. wynika, że wartość energii skutecznego promieniowania docierającego do oka zależy zarówno od warunków obserwacji (dzień/noc), jak i rodzaju źródła (tradycyjne żarowe/LED). W odniesieniu do światła sygnalizacyjnych LED kształt rozkładów widmowych ma postać stosunkowo wąskiego piksu, a długość fali, w stosunku do której występuje maksimum energii promieniowania nie ulega zasadniczym zmianom, niezależnie od tego, czy rozkład widmowy ważony jest czułością oka w warunkach widzenia dziennego, czy nocnego. W przypadku tradycyjnych źródeł żarowych kształt rozkładów jest bardziej

rozciągnięty, a długość fali, w stosunku do której występuje maksimum energii promieniowania, wyraźnie przesuwa się w kierunku fal krótszych przy zastosowaniu rozkładu widmowego czułości oka w odniesieniu do widzenia w warunkach nocnych.

Można więc założyć, że sygnalizacyjne światła LED będą lepiej rozpoznawalne niezależnie od warunków widzenia (dziennych lub nocnych). Wniosek ten nie dotyczy jednak przypadku, w którym uwzględnilibyśmy występowanie zaburzeń w rozpoznawaniu barw oraz patrzenie przez filtry barwne.

Podsumowanie

Rozpatrując zagadnienia związane z rozpoznawaniem światła sygnalizacyjnych należy mieć na względzie to, że percepcja barw tych światła zależy od rozkładu widmowego samego źródła światła oraz charakterystyki widmowej czułości oka w zależności od warunków, w których prowadzona jest obserwacja (np. warunki widzenia dziennego lub nocnego).

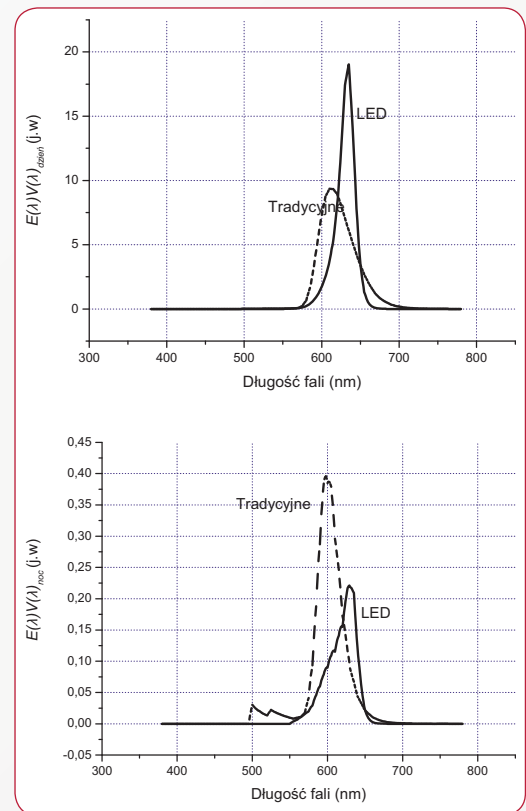
Opisane w artykule przykłady rozkładów światła sygnalizacyjnych są wykorzystywane do obliczeń współczynników przepuszczania światła sygnalizacyjnych, stosowanych m.in. w ocenie okularów przeciwsłonecznych [11]. Zastosowane rozkłady widmowe czułości oka są również rozkładami standardowymi [9], charakteryzującymi oko bez żadnych wad rozpoznawania barw [9]. Jest to więc w pewnym stopniu opis jedynie zbliżony do sytuacji, które mogą występować w warunkach rzeczywistych (np. zmienne, różniące się od siebie źródła, zmienne warunki obserwacji itp.)

Z tego względu planowane jest prowadzenie dalszych badań, w których zostaną uwzględnione rzeczywiste charakterystyki widmowe źródeł światła sygnalizacyjnych, zmierzone z wykorzystaniem metod radiometrycznych. Zostaną również wzięte pod uwagę rzeczywiste rozkłady iluminantu, czyli promieniowania tła, które zmieniają sumaryczny rozkład widmowy promieniowania docierającego do oka.

Dalsze prace będą obejmują również badania, których wynikiem mają być rzeczywiste charakterystyki czułości oka dla osób z takimi wadami wzroku, jak: protanopia (upośledzenie rozpoznawania barwy czerwonej), tritanopia (upośledzenie rozpoznawania barwy niebieskiej) i deuteranopia (upośledzenie rozpoznawania barwy zielonej). Badania te staną się nieodzownym elementem dla pełnego rozpoznania problematyki związanej z rozpoznawaniem światła sygnalizacyjnych. Ma to szczególne znaczenie w kontekście rozwoju technologii związanych z projektowaniem nowych źródeł światła.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nowicki M. *Promieniowanie laserowe*. [w:] *Czynnik szkodliwe w środowisku pracy. Wartości dopuszczalne*. Warszawa, CIOP-PIB 2016
- [2] PN-EN 171:2005 Ochrona indywidualna oczu. Filtry chroniące przed podczerwienią. Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecane stosowanie
- [3] PN-EN 60825-1:2012 Bezpieczeństwo urządzeń laserowych. Część 1: klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika
- [4] Owczarek G., Gralawicz G., Skuza N., Jurowski P. *Light transmission through intraocular lenses with or without yellow chromophore (blue light filter) and its potential influence on functional vision at everyday environmental conditions*. „International Journal of Occupational



Rys. 5. Rozkłady widmowe światła sygnalizacyjnych emitowanych ze źródeł LED oraz tradycyjnych źródeł żarowych dotyczące barwy czerwonej, ważone czułością oka w warunkach dziennych ($E(\lambda) \cdot V(\lambda)_{\text{dzień}}$) i nocnych ($E(\lambda) \cdot V(\lambda)_{\text{noc}}$)

Fig. 5. Spectral distributions of radiation in LED and incandescent red signal lights weighted by the sensitivity of human eye for daylight vision ($E(\lambda) \cdot V(\lambda)_{\text{day}}$) and night vision ($E(\lambda) \cdot V(\lambda)_{\text{night}}$)

Safety and Ergonomics” (JOSE) 2016, 22,1:66-70 DOI: 10.1080/10803548.2015.1083733

[5] Wolska A. *Zasada działania oka – proces widzenia*. [w:] *Technika Świetlna* 1998

[6] Sharpe L.T., Stockman A., Jägle H., Nathans J. *Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness*. [w:] Gegenfurtner K.R., Sharpe L.T. *Color Vision: From Genes to Perception*. Cambridge University Press 1999

[7] Strona internetowa GNU Image Manipulation Program (<https://www.gimp.org/>), dostęp: 29.08.2017

[8] Owczarek G. *Badania nad zastosowaniem systemów rzeczywistości wzbogaconej dla osób z dysfunkcją narządu wzroku*. Sprawozdanie z zadania statutowego CIOP-PIB, Warszawa 2013

[9] CIE scotopic luminosity curve. Crawford (1949) *The scotopic visibility function*. *Proceeding of the Physical Society*. 1951; B62:321-334

[10] International Organization for Standardization (ISO). CIE standard illuminants for colorimetry (Standards No. ISO/CIE 10526: 1999). Geneva: ISO: 1999

[11] PN-EN ISO 12311:2014 Środki ochrony indywidualnej. Metody badań okularów przeciwsłonecznych i odpowiadających im ochron oczu

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyszego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.