

Władysław DYBCZYŃSKI

BARWA ŚWIATŁA NAŚWIETLACZA Z FILTREM^{*)}

STRESZCZENIE *Przeprowadzono analizę przebiegu promieniowania optycznego przez filtr barwny współpracujący z naświetlaczem asymetrycznym. Wyznaczono różnicę barw występującą na powierzchni oświetlanej w funkcji kąta padania światła na element filtrujący.*

Słowa kluczowe: *naświetlacz asymetryczny, filtr oświetleniowy, różnica barw*

1. WPROWADZENIE

W wielu dziedzinach techniki świetlnej zachodzi potrzeba oświetlenia obiektów światłem barwnym. Takie zadanie można zrealizować stosując barwne źródła światła, na przykład świetłówki. Częściej jednak używane są źródła pozornie achromatyczne, które współpracują z barwnymi filtrami. W takim przypadku wiązka świetlna pada na powierzchnię filtra pod różnymi kątami. W funkcji kąta padania zmienia się wartość współczynnika odbicia fresnelowskiego od powierzchni filtra oraz długość drogi optycznej wewnątrz warstwy filtrującej. Oba te czynniki wpływają na rzeczywisty współczynnik przepuszczania elementu filtrującego. Warto więc przeprowadzić analizę zjawiska i określić wpływ kąta padania strumienia świetlnego na barwę światła.

Typowe przykłady oświetlenia światłem barwnym występują w iluminacji, w wystawiennictwie, w oświetleniu scenicznym, w reklamie itp.

^{*)}Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach zadań statutowych S/WE/2/08.

Prof. dr hab. inż. Władysław DYBCZYŃSKI
e-mail: w.dyb@pb.edu.pl
Politechnika Białostocka

W wielu przypadkach chodzi o oświetlenie dużej powierzchni z określoną równomiernością. Dotyczy to zarówno natężenia oświetlenia jak i barwy światła, a jednocześnie oprawa oświetleniowa nie może być usytuowana na wprost powierzchni oświetlanej. Do tego celu służą naświetlacze asymetryczne, które są zdolne spełniać wymienione powyżej wymagania.

2. PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

Powierzchnia oświetlana jest usytuowana pionowo (np. elewacja budynku lub horyzont na scenie teatralnej), a naświetlacz asymetryczny znajduje się u dołu w niewielkiej odległości od niej w porównaniu z jej wysokością (rys. 1). Wysokość oświetlanej powierzchni przyjęto $h = 8,5$ m, a odległość naświetlacza od niej – $d = 1,5$ m. Naświetlacz jest wielokrotnie mniejszy od wymiarów h i d , zatem z pewnym przybliżeniem może być traktowany jako punktowe źródło światła. Jako źródło światła zastosowane w naświetlaczu przyjęto żarówkę halogenową o temperaturze barwowej $T_c = 3200$ K. Źródło to jest chronione płaską szybą (kloszem) przed czynnikami zewnętrznymi. Szyba ta jest zazwyczaj nachylona względem powierzchni oświetlanej. W poniższych rozważaniach przyjęto kąt nachylenia $\mu = 15^\circ$. W celu uzyskania odpowiedniej barwy światła równoległe do szyby, lub w jej miejsce, wprowadza się filtr absorpcyjny. Założono, że grubość filtru szklanego wynosi $b = 4$ mm. Przyjęto cztery rodzaje filtrów: czerwony, żółty, zielony i niebieski. Widmowe współczynniki przepuszczania tych filtrów przedstawiono na rysunku 2.

Naświetlacz został tak zaprojektowany, aby bez filtru na powierzchni oświetlanej można było uzyskać stałą wartość natężenia oświetlenia $E = 100$ lx. Krzywą światłości naświetlacza w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do powierzchni oświetlanej, można wyznaczyć z zależności

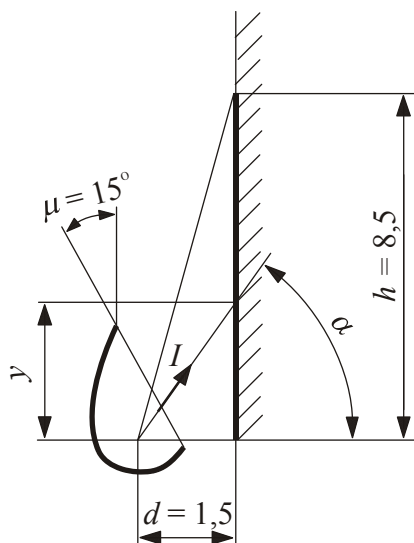
$$I_p = \frac{E \cdot d^2}{\cos^3 \alpha} \quad (1)$$

przy czym: I_p – światłość naświetlacza, cd,

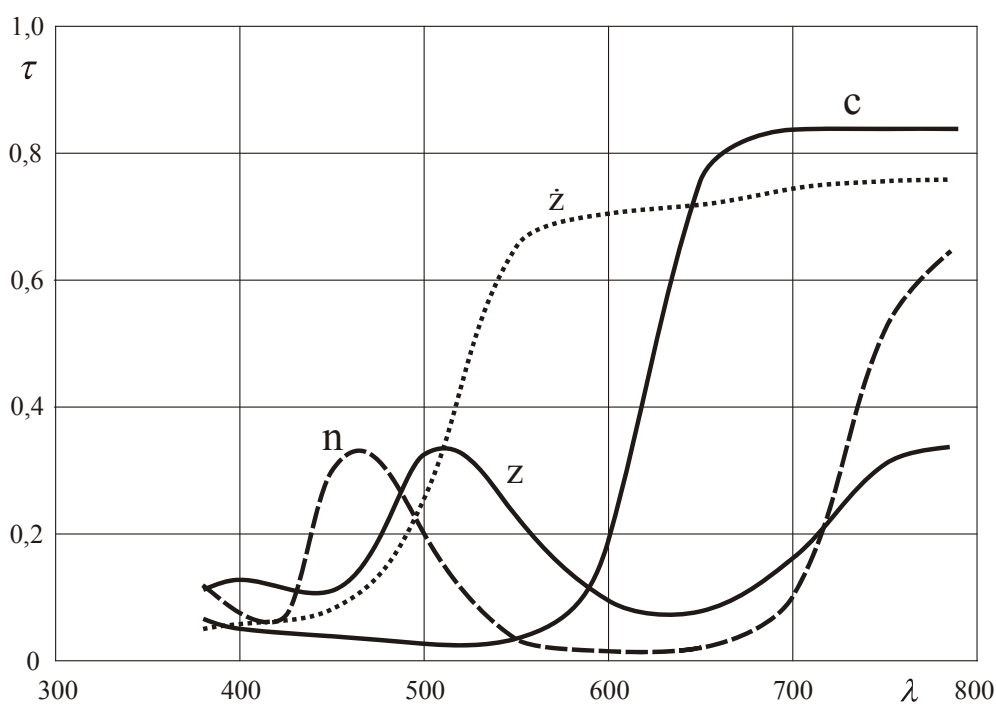
E – wymagane natężenie oświetlenia, lx,

d – odległość naświetlacza od powierzchni oświetlanej, m,

α – kąt wypromieniowania wiązki świetlnej.



Rys. 1. Geometria oświetlenia horyzontu teatralnego

Rys. 2. Widmowe współczynniki filtrów barwnych:
c – czerwony, ż – żółty, z – zielony, n – niebieski

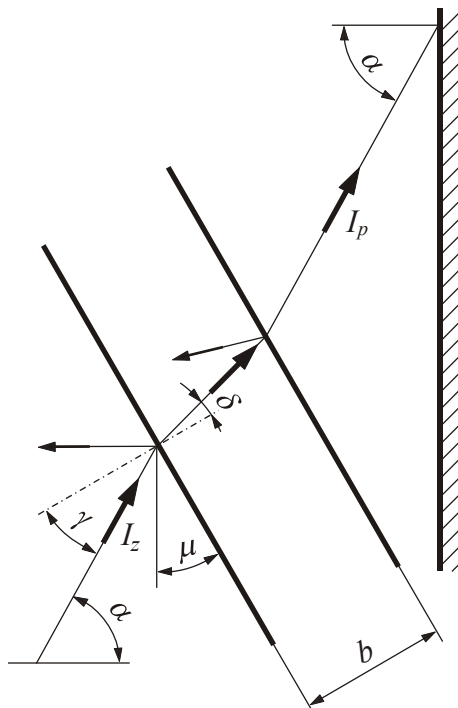
Przy przechodzeniu strumienia świetlnego przez szycę dwukrotnie występują odbicia fresnelowskie (rys. 3), zatem światłość I_z źródła światła wraz z układem optycznym musi być większa od światłości wymaganej I_p , ponieważ trzeba uwzględnić te straty [1]

$$I_z = \frac{I_p}{(1 - \rho_f)^2} \quad (2)$$

$$\text{przy czym: } \rho_f = 0,5 \left[\frac{\sin^2(\gamma - \delta)}{\sin^2(\gamma + \delta)} + \frac{\text{tg}^2(\gamma - \delta)}{\text{tg}^2(\gamma + \delta)} \right] \quad (3)$$

$$\text{lub } \rho_0 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (4)$$

ρ_f – współczynnik odbicia fresnelowskiego dla kąta padania $\gamma \neq 0$,
 ρ_0 – współczynnik odbicia fresnelowskiego dla kąta padania $\gamma = 0$,
 n – współczynnik załamania materiału, z którego została wykonana szyba lub filtry (w obliczeniach przyjęto $n = 1,5$),
 γ – kąt padania wiązki świetlnej na szybę,
 δ – kąt załamania.



Rys. 3. Przechodzenie strumienia świetlnego przez szybę

W obliczeniach nie uwzględniono pochłaniania szyby. Przyjęto stałą wartość współczynnika załamania w funkcji długości fali świetlnej.

Wobec pochylenia szyby (kąt μ), kąt padania γ wynosi

$$\gamma = \alpha - \mu, \quad (5)$$

natomiast kąt załamania δ

$$\delta = \arcsin \frac{\sin \gamma}{n}, \quad (6)$$

co wynika z prawa Fresnela.

3. PRZECHODZENIE STRUMIENIA ŚWIETLNEGO PRZEZ FILTR

W naświetlaczu, w miejsce szyby, zastosowano filtr absorpcyjny o grubości $b = 4$ mm o znanym widmowym współczynniku przepuszczania τ_λ (rys. 2). Współczynnik ten został wyznaczony, gdy wiązka świetlna padała na niego z kierunku normalnego (gdy $\gamma = 0$). W innym przypadku ($\gamma \neq 0$) rzeczywisty widmowy współczynnik przepuszczania będzie mniejszy. Wraz ze wzrostem kąta padania γ zwiększa się odbicie fresnelowskie i rośnie długość drogi optycznej w warstwie filtrującej. Aby wyznaczyć rzeczywisty współczynnik przepuszczania trzeba określić przedtem współczynnik pochłaniania liniowego (a) dla każdego rodzaju filtra w funkcji długości fali świetlnej.

Elementarny strumień świetlny padający na filtr jest proporcjonalny do światłości I_z , zatem do filtra wejdzie wartość $I_z (1 - \rho_0)$. ρ_0 jest to współczynnik odbić fresnelowskich, gdy światło pada z kierunku normalnego (zależność 4). Wiadomo również, że elementarny strumień świetlny wychodzący z filtra wynosi $I_z \cdot \tau_\lambda$, zatem przed wyjściem z filtra będzie miał wartość $\frac{I_z \cdot \tau_\lambda}{1 - \rho_0}$.

Współczynnik pochłaniania liniowego (a) definiowany jest następująco [1]

$$a = \frac{\ln \Phi' - \ln \Phi''}{b} = \frac{\ln I_z (1 - \rho_0) - \ln \frac{I_z \cdot \tau_\lambda}{1 - \rho_0}}{b} = \frac{1}{b} \ln \frac{(1 - \rho_0)^2}{\tau_\lambda} \quad (7)$$

przy czym:

Φ' – elementarny strumień świetlny, który wszedł w warstwę filtrującą,

Φ'' – elementarny strumień świetlny, który przebył drogę przez filtr,

b – długość drogi optycznej,

ρ_0 – współczynnik odbicia fresnelowskiego na granicy dwóch ośrodków,

τ_λ – widmowy współczynnik przepuszczania danego filtra.

Dla dowolnego kąta padania α elementarny strumień świetlny, który wejdzie do warstwy filtrującej, jest proporcjonalny do światłości I_z i zależy od współczynnika odbicia fresnelowskiego ρ_f , będzie proporcjonalny do $I_z(1 - \rho_f)$. Spadek strumienia świetlnego w filtrze wyznacza się z zależności

$$\frac{\Phi'}{\Phi''} = \exp\left(-a \frac{b}{\cos \delta}\right). \quad (8)$$

Na drugiej granicy między ośrodkami też wystąpi odbicie fresnelowskie, zatem rzeczywisty widmowy współczynnik przepuszczania τ_{rz} wyniesie (dla przyjętego kąta α)

$$\tau_{rz} = (1 - \rho_f)^2 \exp(-a \cdot b / \cos \delta), \quad (9)$$

przy czym: $b/\cos\delta$ – długość drogi optycznej, δ – kąt załamania.

4. OBLICZENIA KOLORYMETRYCZNE

Rozkład widmowy $\varphi_w(\lambda)$ promieniowania żarówki halogenowej może być wyznaczony eksperymentalnie, albo z wystarczającą dokładnością ze wzoru Plancka

$$\varphi_w(\lambda) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T} - 1\right)} \quad (10)$$

przy czym: $c_1 = 37415 \cdot 10^6$, Wnm^2 ,

$c_2 = 14\,388\,800$, nmK ,

T – temperatura barwowa, K ,

λ – długość fali promieniowania, nm .

Przy przechodzeniu przez filtr moc promieniowania ulega zmniejszeniu, co wyraża iloczyn $\varphi_w(\lambda) \cdot \tau_{rz}$.

W obliczeniach kolorymetrycznych przyjmuje się unormowany rozkład widmowy $\varphi(\lambda)$ promieniowania, zatem wszystkie wartości $\varphi_w(\lambda)$ trzeba wymnożyć przez współczynnik normujący, wyznaczony zgodnie z zależnością [2]

$$\varphi(\lambda) = \frac{100 \cdot \varphi_w(\lambda) \cdot \tau_{rz}(\lambda)}{\int_{380}^{780} \varphi_w(\lambda) \cdot \tau_{rz} \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (11)$$

przy czym $\bar{y}(\lambda)$ – składowa trójchromatyczna widmowa.

Następnie wyznacza się składowe trójchromatyczne (X, Y, Z) światła przechodzącego przez filtr pod kątem α [3]:

$$\left. \begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

przy czym $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ - składowe trójchromatyczne widmowe.

Chcąc oznaczyć różnicę barwy ΔE najlepiej skorzystać z układu kolorymetrycznego CIELAB (1976)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (13)$$

przy czym:

$$\left. \begin{aligned} L^* &= \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \\ b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Symbole składowych trójchromatycznych bez indeksów (X, Y, Z) dotyczą promieniowania określonego źródła światła (np. żarówki o temperaturze barwowej 3200 K), które przeszło przez wybrany filtr (czerwony, żółty, zielony lub niebieski) pod znanym kątem α (z przedziału od 0 do 80°). Natomiast symbole z indeksem 0 (X_0, Y_0, Z_0) dotyczą promieniowania samego źródła światła.

Wobec unormowania rozkładu widmowego (wzór 11) rozważania prowadzone są w jednej płaszczyźnie przekroju bryły barw. W rzeczywistych warunkach

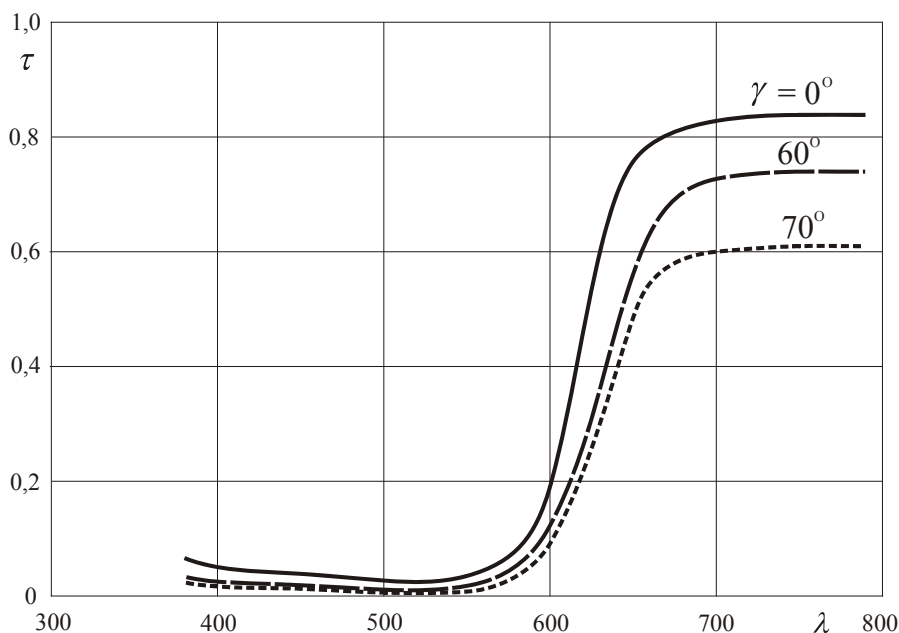
kach obserwacji oświetlanej płaszczyzny dochodzi jeszcze zmiana luminancji w poszczególnych punktach obserwowanego obiektu.

Najmniejsze zmiany barwy światła w funkcji kąta γ padania światła występują przy filtrze żółtym. Punkty chromatyczności leżą prawie równolegle do linii ciała czarnego na wykresie u, v . Można więc w tym przypadku określić temperaturę barwową najbliższą. Różnicę temperatury barwowej można w tym przypadku określić w miredach. Jak wiadomo różnica wynosząca 1 mired jest zauważana przez specjalistów. Różnicę 5 miredów zauważa każdy człowiek (bez wady wzroku). Natomiast różnica 15 miredów może być w pewnych przypadkach przeszkadzająca w odbiorze zaaranżowanego obrazu danej sceny.

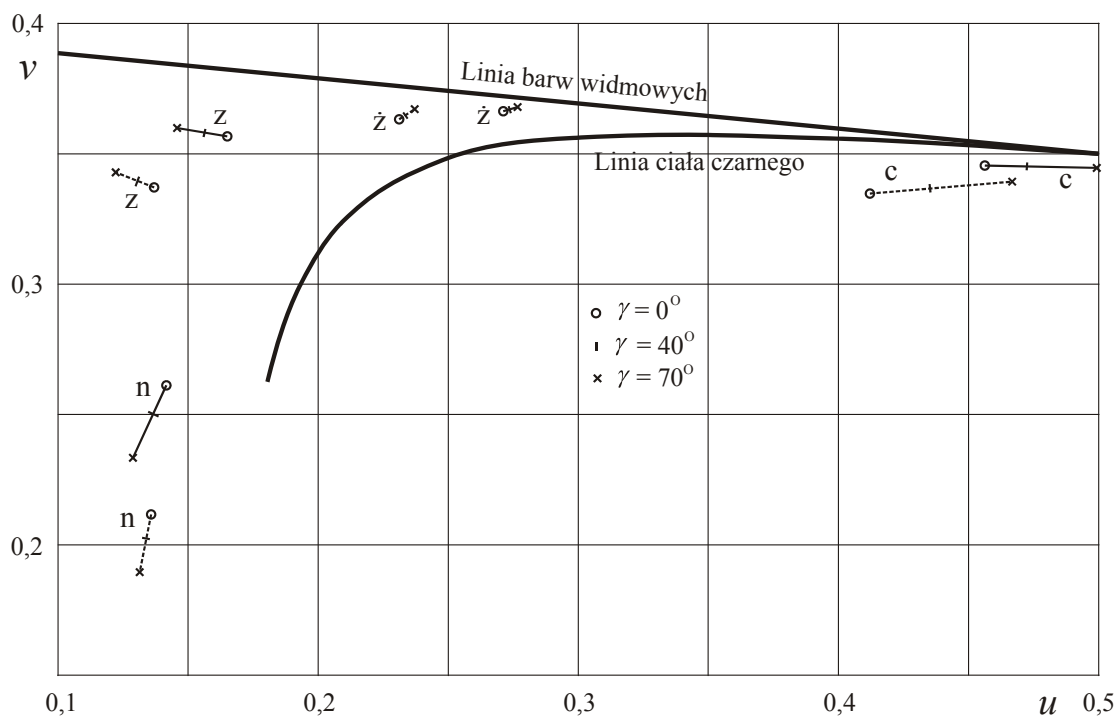
5. WYNIKI OBLICZENIOWE

Przebieg krzywej widmowego współczynnika przepuszczania, dla kilku wybranych kątów padania światła na filtr czerwony, przedstawiono na rys. 4.

Położenie punktów chromatyczności na karcie o współrzędnych u, v przedstawiono na rysunku 5. Przyjęto dwie temperatury ciała czarnego: 3200 K i 6000 K oraz cztery rodzaje filtrów.

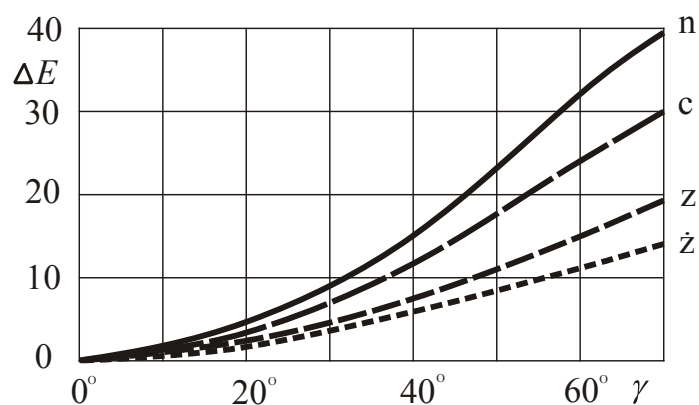


Rys. 4. Krzywe widmowego współczynnika przepuszczania filtra czerwonego dla kilku wartości kąta γ : 0° ; 60° i 70°

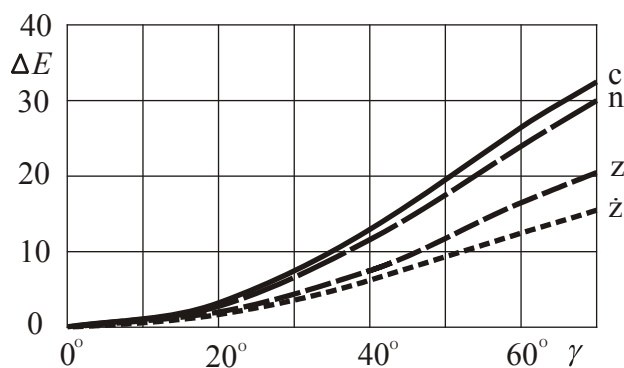


Rys. 5. Położenie punktów chromatyczności (linie ciągłe) światła lampy żarowej o temperaturze barwowej 3200 K po przejściu przez filtry (c – czerwony, ż – żółty, z – zielony, n – niebieski) oraz promiennika temperaturowego 6000 K (linie przerywane). Naniesiono również linię ciała czarnego

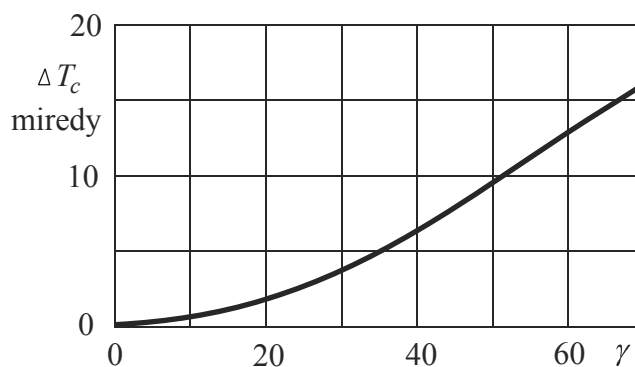
Wyniki obliczeń różnicy barwy ΔE zostały przedstawione na rysunkach 6 i 7 w funkcji kąta padania γ dla czterech rodzajów filtrów.



Rys. 6. Krzywe różnic barwowych ΔE w funkcji kąta γ padania światła (3200 K) dla filtrów: c – czerwony, ż – żółty, z – zielony, n – niebieski



Rys. 7. Krzywe różnic barwowych ΔE w funkcji kąta γ padania światła (6000 K) dla filtrów:
c – czerwony, ż – żółty, z – zielony, n – niebieski



Rys. 8. Zmiana temperatury barwowej światła (3200 K) przechodzącego przez filtr żółty pod kątem γ

Na rysunku 8. przedstawiono przebieg zmian temperatury barwowej światła (3200 K) przechodzącego przez filtr żółty w funkcji kąta γ padania promieniowania.

6. UWAGI I WNIOSKI

1. Zmiany w krzywych widmowego współczynnika przepuszczania nie przebiegają liniowo wraz z kątem γ padania światła na filtr. W zakresie małych kątów są niewielkie, a powyżej 50° – znaczące (rys. 4).
2. Zmiana położenia punktów chromatyczności w układzie u, v światła przechodzącego przez filtry czerwone i żółte przebiega w przybliżeniu równoległe do

- krzywej punktów chromatyczności ciała czarnego. W przypadku filtrów zielonych i niebieskich ze wzrostem kąta padania zwiększa się głównie nasycenie barwy.
3. Krzywe, charakteryzujące różnice barw między promieniami przechodzącymi przez filtr z kierunku normalnego a promieniami padającymi pod określonym kątem γ , wykazują duże zmiany przy większych kątach padania.
 4. Wraz ze zmianą temperatury barwowej źródła światła zastosowanego w naświetlaczu filtry zachowują się podobnie. Barwy czerwona i niebieska mają największe różnice, a zielona i zwłaszcza żółta wykazują najmniejsze zmiany.
 5. Z wykresu zamieszczonego na rysunku 8. wynika, że powyżej kąta padania około 45° różnica barwy światła żółtego jest zauważalna w zwykłych warunkach obserwacyjnych.
 6. W rozważaniach nie uwzględniono zmiany natężenia oświetlenia w funkcji kąta padania γ . Zmiana ta wywoła spadek luminancji oświetlanej powierzchni w funkcji wysokości świecenia. Fakt ten zwiększy wrażenie postrzegania różnicy barw.

LITERATURA

1. Dybczyński W., Oleszyński T., Skonieczna M.: Projektowanie opraw oświetleniowych. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej. Białystok. 1996.
2. Mielicki J.: Zarys wiadomości o barwie. Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki. Łódź 1997.
3. Publikacja CIE nr 15.2 Colorimetry, 2nd ed. 1986.

Rękopis dostarczono dnia 10.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Maciej Rafałowski

COLOUR OF LIGHT IN A FLOODLIGHT WITH A FILTER

Władysław DYBCZYŃSKI

SUMMARY *The analysis of the optical radiation course through the coloured filter cooperating with the asymmetrical floodlight is conducted. The difference of the colour on illuminated surface as a function of the incidence angle of light onto the filtering element is evaluated.*



Prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej w 1959 roku. Do 1993 r. pracował w Filmowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym „Techfilm” w Warszawie. W 1979 r. obronił rozprawę doktorską w Politechnice Poznańskiej, a w 1987 r. rozprawę habilitacyjną w Politechnice Warszawskiej. Od 1983 r. pracuje w Politechnice Białostockiej na Wydziale Elektrycznym. Tytuł profesora otrzymał 1999 r. Specjalności: technika świetlna, miernictwo promieniowania optycznego, technika światłowodowa.