

PRZEMYSŁAW TABAKA¹, IRENA FRYC²

¹ Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka; ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: przemyslaw.tabaka@wp.pl

² Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej, Politechnika Białostocka; ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: i.fryc@pb.edu.pl

**WPLYW WŁAŚCIWOŚCI ODBICIOWYCH PODŁOŻA
NA KTÓRYM ZAINSTALOWANO DANĄ OPRAWĘ
OŚWIETLENIOWĄ NA WZGLĘDNĄ WARTOŚĆ
ZANIECZYSZCZENIA JEJ OTOCZENIA ŚWIATŁEM**

Artykuł zawiera wyniki badań dotyczących efektu zanieczyszczenia otoczenia światłem. Przeanalizowany został wpływ zastosowanego typu oprawy oświetleniowej oraz rodzaju podłoża, na którym jest ona zainstalowana, na względne wartości natężenia oświetlenia nad daną lampą. W rozważaniach uwzględniono typowe, stosowane w oświetleniu terenów zewnętrznych, oprawy oświetleniowe umiejscowione na podłożu typu: trawa, gleba, beton, asfalt i śnieg. Założono, że oprawy te emitują jednakowy strumień świetlny. Obliczenia przeprowadzono wykorzystując program komputerowego wspomagania projektowania oświetlenia DIALux. Wykazano, że stopień zanieczyszczenia światłem otoczenia zależy nie tylko od krzywej światłości oprawy oświetleniowej, ale także od właściwości odbiciowych podłoża na którym umiejscowiono tę lampę.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie światłem, oprawa oświetleniowa, całkowity współczynnik odbicia

I. WSTĘP

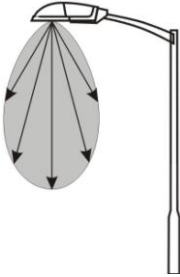
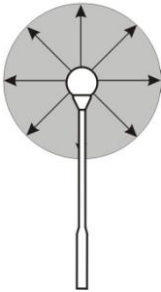
Współcześnie na popularności zyskuje oświetlenie terenów zewnętrznych. Sprawia ono, że otoczenie staje się bardziej atrakcyjne po zapadnięciu zmroku, zwiększając tym samym poczucie bezpieczeństwa [Tabaka i Fryc 2015]. Do oświetlania terenów zewnętrznych stosowane są rozmaite typy opraw oświetleniowych (tabele 1-3), a wymagania dotyczące parametrów oświetleniowych danego rodzaju terenów zewnętrznych są ujęte w normach [PN-EN 12464-2:2008, PN-71/E 02034, PN-EN 12193:2008] oraz w raportach technicznych [CIE S 015/E:2005, CIE 88-1990, CIE 115-2010] a także w PKN-CEN/TR 13201-1:2016-03. Rozróżniają one oświetlenie dróg i ulic oraz pozostałe tereny otwarte. Podano w nich m.in. wymagane wartości: luminancji, natężenia oświetlenia, maksymalnej światłości kierunkowej oprawy oświetleniowej, które to parametry mają zapewnić pożądane warunki oświetleniowe.

W niniejszym artykule w celu przeanalizowania wpływu zastosowanego typu oprawy oświetleniowej oraz rodzaju podłoża, na którym jest ona zainstalowana, na efekt zanieczyszczenia otoczenia światłem, przeprowadzono badania symulacyjne. Z punktu widzenia projektowania oświetlenia, do najbardziej istotnych danych eksploatacyjnych oprawy należy zaliczyć jej strumień

światłny oraz sposób dystrybucji światła w przestrzeni tj. jej bryłę fotometryczną. W przypadku opraw oświetleniowych, których kształt bryły fotometrycznej wykazuje symetrię obrotową, wystarczy operować pojęciem krzywej światłości (odzwierciedla ona zależność światłości I w funkcji kąta γ określającego kierunek w stosunku do osi optycznej oprawy - zwykle przedstawiana jest ona graficznie na wykresie w układzie biegunowym). Te parametry w pełni opisują sposób dystrybucji strumienia świetlnego przez daną oprawę. Oprawy często emitują światło zarówno powyżej jak i poniżej swojego geometrycznego środka. W związku z tym, pojawia się niepożądany w otoczeniu efekt zanieczyszczenia światłem. W wielu publikacjach można się spotkać ze stwierdzeniem, że z punktu widzenia zanieczyszczenia światłem najbardziej pożądanym jest stosowanie opraw oświetleniowych, których strumień świetlny emitowany jest wyłącznie w kierunku podłoża. Warto jednak zauważyć, że część promieniowania kierowana w stronę podłoża zostanie od niego odbita w kierunku nieboskłonu, wpływając w ten sposób na efekt zanieczyszczenia światłem. Stopień zanieczyszczenia światłem, będzie zatem zależny nie tylko od tego w jaki sposób jest rozsyłane promieniowanie świetlne z oprawy tj. od konstrukcji układu świetlnooptycznego użytkowanej oprawy oświetleniowej, ale także będzie on zależny od właściwości odbiciowych otoczenia wokół oprawy.

Tabela 1 – Table 1

Charakterystyka typowych opraw oświetleniowych stosowanych do oświetlenia terenów zewnętrznych / *Characteristics of typical luminaires for outdoor lighting*

Wizualizacja dystrybucji strumienia świetlnego <i>Visualization of luminous flux distribution</i>			
oprawa nr 1 / <i>luminaire No. 1</i>		oprawa nr 2 / <i>luminaire No. 2</i>	
			
Zależność matematyczna opisująca krzywą światłości <i>The relationship describing luminaire intensity curve</i>			
$I_{\gamma} = I_0 \cos^3 \gamma$		$I_{\gamma} = I_0 = \text{const}$	
Podział emitowanego [%] strumienia świetlnego <i>The breakdown [%] of emitted luminous flux</i>			
w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	100	w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	50
w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	0	w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	50

W tabelach 1-3 przedstawiono charakterystyki siedmiu typowych rodzajów opraw oświetleniowych, które mogą być wykorzystane do oświetlania terenów zewnętrznych. Tabele te zawierają wizualizację dystrybucji strumienia świetlnego oraz równanie opisujące krzywą światłości danej oprawy. Przedstawiono także wartości liczbowe (w procentach) informujące o ilości strumienia wysyłanego zarówno w dolną jak i górną półprzestrzeń.

Tabela 2 – Table 2

Charakterystyka typowych opraw oświetleniowych stosowanych do oświetlenia terenów zewnętrznych / *Characteristics of typical luminaires for outdoor lighting*

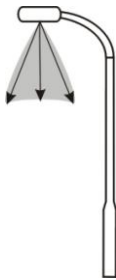
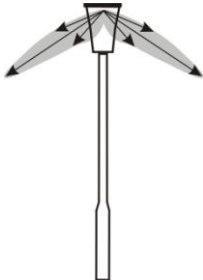
Wizualizacja dystrybucji strumienia świetlnego <i>Visualization of luminous flux distribution</i>					
oprawa nr 3 <i>luminaire No. 3</i>		oprawa nr 4 <i>luminaire No. 4</i>		Oprawa nr 5 <i>luminaire No. 5</i>	
Zależność matematyczna opisująca krzywą światłości <i>The relationship describing luminaire intensity curve</i>					
$I_{\gamma} = I_0 / 3(1 + 2 \cos \gamma)$		$I_{\gamma} = I_0(1 + \sin \gamma)$		$I_{\gamma} = I_0 \cos^4 \gamma$	
Podział emitowanego [%] strumienia świetlnego <i>The breakdown [%] of emitted luminous flux</i>					
w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	63	w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	50	w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	50
w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	37	w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	50	w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	50

Postęp, jaki dokonał się ostatnimi czasy w technologii półprzewodnikowych źródeł światła typu LED, spowodował, że coraz większą popularność zyskują oprawy oświetleniowe LED. Coraz częściej można spotkać konstrukcje opraw oświetleniowych (tabela 3) typu LED, które zarówno pod względem wartości emitowanego strumienia świetlnego jak i sposobu dystrybucji światła odpowiadają parametrom klasycznych opraw oświetleniowych wyposażonych np. w lampy wyładowcze (sodowe lub metalohalogenkowe).

Oprawy typu LED znajdują zastosowanie w wielu aranżacjach oświetleniowych, w tym także w oświetleniu terenów zewnętrznych. Mają one szereg niewątpliwych zalet i umożliwiają integrację z inteligentnymi systemami oświetlenia i monitoringu miast. Charakterystyka wybranych parametrów typowych LED-owych opraw oświetleniowych stosowanych do oświetlenia terenów zewnętrznych, zamieszczona została w tabeli 3.

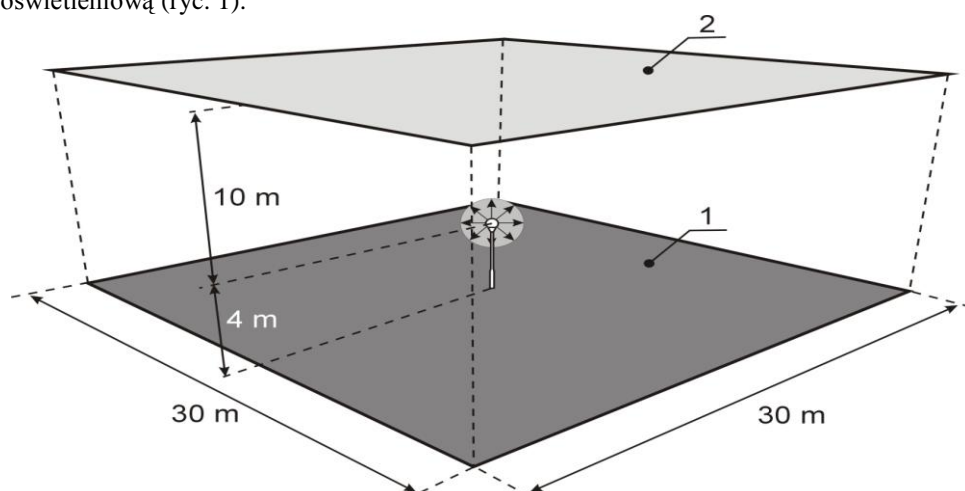
Tabela 3 – Table 3

Charakterystyka typowych LED-owych opraw używanych do oświetlenia terenów zewnętrznych
Characteristics of typical outdoor lighting LED

Wizualizacja dystrybucji strumienia świetlnego <i>Visualization of luminous flux distribution</i>			
oprawa nr 6 / luminaire No. 6		oprawa nr 7 / luminaire No. 7	
			
Zależność matematyczna opisująca krzywą światłości [zaczepnięta z pracy [Moreno i in. 2014] <i>The relationship describing luminaire intensity curve [taken from Moreno and all 2014]</i>			
$I_{\gamma} = UG(\gamma) + (1-U)G(\gamma_p) \cdot \exp\left[-g_5(\gamma - \gamma_p)^2\right]$ $G(\gamma) = g_1 - g_2 \cdot \exp\left[-g_3(\gamma - g_4)^2\right]$ <p>γ_p - kąt dla którego funkcja przyjmuje wartość maksymalną (przyjęto $\gamma_p = 23$) / <i>the angle for which the function has maximum value (was used $\gamma_p = 23$)</i></p> <p>$g_1 - g_4$ współczynniki zaczerpnięte z pracy [Moreno i in. 2014] / <i>coefficients [Moreno and all 2014]</i></p> $U = \begin{cases} 1 & \text{dla } \gamma < \gamma_p \\ 0 & \text{dla } \gamma \geq \gamma_p \end{cases}$		$I_{\gamma} = \sum_1^3 g_{i1} \cdot \exp\left(-g_{i2} (\gamma - g_{i3})^2\right)$ <p>$g_{i1} - g_{i4}$ współczynniki [Moreno i in. 2014] / <i>coefficients [Moreno and all 2014]</i></p>	
Podział emitowanego [%] strumienia świetlnego <i>The breakdown [%] of emitted luminous flux</i>			
w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	100	w dolną półprzestrzeń <i>down</i>	99
w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	0	w górną półprzestrzeń <i>upward</i>	1

III. METODYKA PRZEPROWADZENIA OBLICZEŃ

W celu przeanalizowania, jaki wpływ na efekt zanieczyszczenia światłem ma sposób dystrybucji światła oprawy oświetleniowej i rodzaj podłoża na którym jest ona zainstalowana, przeprowadzono obliczenia symulacyjne. Na podstawie zależności matematycznych (podanych w tabelach 1-3) wygenerowano pliki (z rozszerzeniem LDT) z danymi fotometrycznymi poszczególnych opraw. Jest to format akceptowalny przez oprogramowanie komputerowe, wykorzystywane w celu przeprowadzenia obliczeń oświetleniowych. Pliki te zaimplementowano do programu DIALux wspomagającego proces projektowania oświetlenia. Następnie stworzono wirtualne podłoże w kształcie kwadratu (o długości boku 30 m), w centrum którego umieszczono latarnię wraz z oprawą oświetleniową (ryc. 1).



Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Ryc. 1. Wizualizacja: podłoża 30x30 m z latarnią na środku (1) oraz umieszczoną na wysokości 10 m siatką obliczeniową (2)

Fig. 1. Visualization: ground 30x30 m with a lantern in the middle (1) and located at a height of 10 m computing grid (2)

Oprawę oświetleniową ulokowano na wysokości 4 m, jako typowej wartości dla oświetlenia parków czy alei z ruchem pieszych. Dodatkowo założono, że będzie ona umiejscowiona nad podłożem, które będzie miało możliwość zmiany wartości całkowitego współczynnika odbicia światła. W rozważaniach uwzględniono takie powierzchnie jak: śnieg, trawa, gleba, asfalt oraz beton. Wartości całkowitego współczynnika odbicia światła zawarto w tabeli 4. We wszystkich analizowanych przypadkach strumień świetlny oprawy był identyczny i wynosił 7300 lm. Zgodnie z informacją zawartą w publikacji Brons'a i współpracowników [2008], siatkę obliczeniową (2) umieszczono 10 m nad latarnią, równoległe do podłoża (1) (ryc. 1).

Tabela 4 – Table 4

Wartość całkowitego współczynnika odbicia podłoża / Total reflectance of the ground's surface








Rodzaj podłoża Type of ground's surface	Śnieg Snow	Trawa Grass	Gleba Soil	Asfalt Asphalt	Beton Concrete
Współczynnik odbicia ρ Total reflectance	89%	15%	11%	9%	13%

IV. WYNIKI OBLICZEŃ

W celu zilustrowania wpływu rodzaju podłoża na stopień zanieczyszczenia światłem przeprowadzono obliczenia, których wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5 – Table 5

Względne wartości [%] natężenia oświetlenia, przy przyjęciu, jako odniesienia wartości natężenia oświetlenia przy umieszczeniu oprawy na glebie / *Relative [%] value of illuminance compared to illuminance when the luminaire is on the ground*

Oprawa <i>Luminaire</i>	Wartości <i>Value</i>				
	Śnieg <i>Snow</i>	Trawa <i>Grass</i>	Gleba <i>Soil</i>	Asfalt <i>Asphalt</i>	Beton <i>Concrete</i>
1. 	860%	138%	100%	81%	121%
2. 	161%	103%	100%	99%	101%
3. 	219%	106%	100%	97%	103%
4. 	163%	103%	100%	99%	101%
5. 	144%	102%	100%	99%	101%
6. 	867%	137%	100%	82%	120%
7. 	843%	136%	100%	82%	118%

Dane, umożliwiające opracowanie zestawienia przedstawionego w tabeli 5, zostały uzyskane na podstawie obliczeń, wykonanych przy użyciu oprogramowania DIALux. Oprogramowanie to umożliwia wyznaczanie wartości natężenia oświetlenia na zdefiniowanej przez użytkownika siatce obliczeniowej. Zmiany w wartościach względnych [%] natężenia oświetlenia nad daną oprawą wyliczone zostały na podstawie uśrednionej wartości natężenia oświetlenia. Uśrednienia tego dokonano dla 5626 punktów siatki obliczeniowej równomiernie rozmieszczonych w odstępach co 0,4 m. Jako odniesienie przyjęto wartości uzyskane, dla każdej z lamp, dla podłoża o współczynniku odbicia odpowiadającym glebie.

IV. WNIOSKI

1. Zwiększenie negatywnego efektu zanieczyszczenia światłem najbardziej zauważalne jest w przypadku opraw emitujących światło wyłącznie w dolną półprzestrzeń.
2. Wraz ze wzrostem współczynnika odbicia podłoża zwiększa się poziom zanieczyszczenia światłem w przypadku opraw emitujących światło tylko w dolną półprzestrzeń.
3. W odniesieniu do wszystkich opraw oświetleniowych największy wpływ na efekt zanieczyszczenia światłem uzyskano przy podłożu pokrytym śniegiem, najmniejszy zaś przy powierzchni asfaltowej.
4. Wyznaczone na podstawie przeprowadzonych obliczeń wartości jednoznacznie wskazują, że nie tylko kształt bryły fotometrycznej oprawy oświetleniowej, ale i rodzaj podłoża nad którym ona się znajduje, ma wpływ na efekt zanieczyszczenia światłem. A zatem oba te aspekty (zdaniem autorów) powinny być brane pod uwagę w procesie projektowania oświetlenia terenów otwartych.

BIBLIOGRAFIA

1. Brons J.A., Bullough J.D., Rea M.S. 2008. Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution. *Lighting Res. Technol.* 40. 201-224.
2. Document International Commission on Illumination. CIE S 015/E:2005. *Lighting of Outdoor Work Places.*
3. Document International Commission on Illumination. CIE 88-2004 *Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.*
4. Document International Commission on Illumination. CIE 115-2010 *Lighting of roads for motor and pedestrian traffic.*
5. Moreno I., Avendaño-Alejo M., Saucedo-A. T. A. 2014. Bugarin Modeling LED street lighting. *Applied Optics* Vol. 53. No. 20 / 10. 4420-4430.
6. PN-EN 12464-2:2008 *Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.*
7. PN-E-02034:1971 *Oświetlenie elektryczne terenów budowy, przemysłowych, kolejowych i portowych oraz dworców i środków transportu publicznego.*
8. PN-EN 12193:2008 *Światło i oświetlenie - Oświetlenie w sporcie. PKN-CEN/TR 13201-1:2016-03 Oświetlenie dróg - Część 2: Wymagania eksploatacyjne.*
9. Tabaka P., Fryc I. 2015. Zależność poziomu zanieczyszczenia otoczenia światłem od kształtu krzywej użytkowanej oprawy oświetleniowej. *Kosmos. T. 64. nr 4.* 669-677.

THE IMPACT OF GROUND REFLECTANCE ON RELATIVE VALUES OF LIGHT POLLUTION CREATED BY OUTDOOR LAMP

Summary

The article contains the research results on light pollution relative values. The effect of used luminaire type was analyzed and the kind of ground on which the lamp was installed. Calculations were performed by using professional computer-aided lighting design

software DIALux. A number of typical outdoor lighting fixtures were taken into account. These lamps were placed on a grass, soil, concrete, asphalt and snow ground. It was assumed that these luminaires emit the same value of luminous flux. It has been shown that the degree of light pollutions dependent not only on the intensity curve of given luminaire but also on the reflective properties of the ground under the lamp.

Key words: light pollution, luminaire, reflectance