

Zanieczyszczenia nocnego nieboskłonu światłem emitowanym przez oprawy oświetlenia zewnętrznego

Streszczenie. Przeanalizowany został wpływ typu oprawy oświetleniowej oraz rodzaju źródła światła na efekt zanieczyszczenia nieboskłonu światłem. W rozważaniach uwzględniono typowe, stosowane w oświetleniu terenów zewnętrznych oprawy ze źródłami typu HPS, MH i LED. Założono, że emitują one jednakowy strumień świetlny. Wykazano, że stopień zanieczyszczenia światłem zależy zarówno od rodzaju krzywej światłości użytkowanej oprawy oświetleniowej i zastosowanego źródła światła oraz właściwości odbiciowych podłoża w miejscu ich zainstalowania.

Abstract. In the paper there are presents the impact of the type of luminaire and light source on the effect of pollution of the night sky light. Into account were taken typical outdoor lighting fixtures with HPS, MH and LED lamp. It was assumed that luminaires are emit the same luminous flux. It has been shown that the degree of light pollution dependent on lighting fixture intensity curve, the type of light source and the reflective properties of places where lamp is installed. (**The night sky light pollution created by outdoor luminaires**)

Słowa kluczowe: oświetlenie zewnętrzne, oprawa oświetleniowa, źródło światła, zanieczyszczenie światłem

Keywords: exterior lighting, light fixture, lamp, light pollution

Wstęp

Oświetlenie terenów zewnętrznych jest instalowane w celu uczynienia danego miejsca zarówno bezpiecznym jak i atrakcyjnym. Od wielu lat są prowadzone badania dotyczące tego w jaki sposób zapewnić komfortu użytkowników i pożądane warunki oświetleniowe panujących w danym miejscu, przy jednoczesnej minimalizacji jego kosztów i ograniczeniu niepożądanych skutków w otoczeniu. Rozpatruje się wymagania odnośnie takich parametrów jak luminancja, natężenie oświetlenia, maksymalna wartość światłości kierunkowej oprawy oświetleniowej. Efekty prac wielu międzynarodowych zespołów zostały ujęte w normach: PN-EN 124642:2008 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz [1], PN-71/E 02034 Oświetlenie elektryczne terenów budowy, przemysłowych, kolejowych i portowych oraz dworców i środków transportu publicznego [2], PN-EN 12193:2008 Światło i oświetlenie - Oświetlenie w sporcie [3] oraz raportach technicznych CIE S 015/E:2005 Lighting of Outdoor Work Places [4], CIE 88-1990 Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses [5], CIE 115-2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic [6] oraz w dokumencie PKN-CEN/TR 13201-1:2016-03 Oświetlenie dróg - Część 2: Wymagania eksploatacyjne [7]. Dokumenty te rozróżniają oświetlenie dróg i ulic oraz pozostałych terenów otwartych.

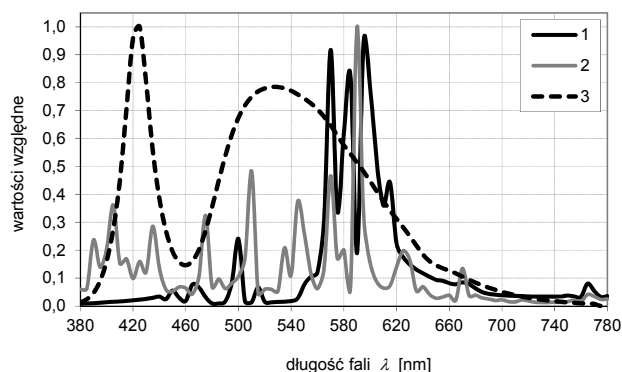
Do oświetlania terenów zewnętrznych stosowane są rozmaite typy opraw oświetleniowych z różnorodnymi źródłami światła. W wielu publikacjach można się spotkać ze stwierdzeniem, że z punktu widzenia minimalizowania zanieczyszczenia światłem najbardziej pożądanym jest stosowanie opraw oświetleniowych, których strumień świetlny emitowany jest wyłącznie w kierunku podłoża. Jednak warto 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 świetlny-optycznego użytkowanej oprawy oświetleniowej, ale także będzie on zależny od właściwości odbiciowych otoczenia wokół oprawy.

W niniejszym artykule przeprowadzona została analiza wpływu zastosowanej oprawy oświetleniowej oraz rodzaju podłoża (trawa, beton, asfalt, gleba, śnieg) na którym jest ona zainstalowana, na efekt zanieczyszczenia światłem. W analizie rozpatrywane były krzywe światłości dwóch

typowych opraw oświetlenia zewnętrznego tj. kuli mlecznej oraz oprawy ulicznej. W rozważaniach uwzględniono fakt, że oprawy te mogą współpracować z różnymi źródłami światła, a mianowicie z wysokoprężną lampą sodową (HPS), wysokoprężną lampą metalohalogenkową (MH) lub diodami elektroluminescencyjnymi (LED).

Parametry rozpatrywanych opraw oświetleniowych oraz rodzaju podłoża

Podstawowym elementem składowym każdej oprawy oświetleniowej jest źródło światła. Najpopularniejszym źródłem światła stosowanym w oświetleniu zewnętrznym są wysokoprężne lampy sodowe HPS (ang. high pressure sodium). Z uwagi na stosunkowo słabe parametry kolorymetryczne, w przypadku oświetlenia terenów zielonych (np. parki, skwery) czy reprezentatywnych ulic, często zastępowane są one lampami metalohalogenkowymi MH (ang. metal halide). W ostatnich latach coraz większą popularnością cieszą się półprzewodnikowe źródła LED (ang. light emitting diode). Wynika to m.in. z konieczności poszukiwania oszczędności w zużyciu energii elektrycznej (co ujęte zostało w wymaganiach normatywnych dot. efektywności źródeł światła). Charakterystyki względnego rozkładu mocy promienistej przykładowych źródeł światła stosowanych w oprawach oświetlenia zewnętrznego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Względne charakterystyki rozkładów widmowych, gdzie: 1 – wysokoprężna lampka sodowa HPS, 2 – wysokoprężna lampka metalohalogenkowa MH, 3 – źródło LED

Na podstawie względnych rozkładów mocy promienistej (rys. 1.) obliczono następujące parametry: fotometryczną skuteczność świetlną η [lm/W] (w oparciu o zależność 1), współrzędne chromatyczne x , y , temperaturę barwową najbliższą T_b oraz ogólny wskaźnik oddawania barw R_a . Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

$$(1) \quad \eta = \frac{K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda}$$

gdzie: K_m – fotometryczny równoważnik promieniowania, $S(\lambda)$ – widmowy rozkład mocy promieniowania lampy, $V(\lambda)$ – względna skuteczność promieniowania monochromatycznego ludzkiego oka.

Tabela 1. Parametry rozpatrywanych źródeł światła

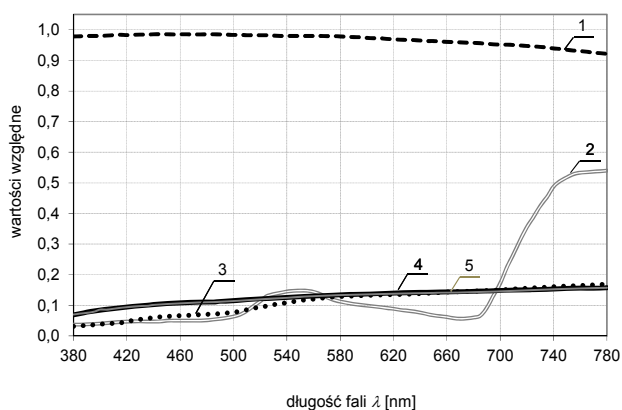
Źródło światła	η [lm/W]	x [-]	y [-]	T_b [K]	R_a [-]
HPS	381	0,5217	0,4180	2071	20
MH	296	0,3726	0,3856	4277	64
LED	327	0,3107	0,4123	6188	66

Z punktu widzenia zanieczyszczenia światłem, po za charakterystyką spektralną źródła światła zainstalowanego w oprawie, istotną rolę odgrywa także podłoże na którym ulokowano latarnię. W zależności od kształtu krzywej światłości oprawy oświetleniowej część (lub całość) emitowanego strumienia świetlnego będzie skierowana na podłoże, od którego zostanie odbita. A zatem część strumienia świetlnego (po odbiciu) trafi w kierunku nieboskłonu. Takim podstawowym parametrem opisującym właściwości danej powierzchni jest całkowity współczynnik odbicia światła, którego wartości (dla kilku typowych rodzajów podłoży) zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartość całkowitego współczynnika odbicia podłoża

Rodzaj podłoża	śnieg	trawa	gleba	asfalt	beton
współczynnik odbicia ρ	89%	15%	11%	9%	13%

Wobec faktu, że w praktyce nie występują podłoża charakteryzujące się aselektywnością odbicia (liniowa spektralna charakterystyka odbicia), zachodzi zatem potrzeba operowania pojęciem widmowego współczynnika odbicia światła. Innymi słowy w wyniku interakcji światła z podłożem nastąpi zmiana rozkładu widmowego promieniowania. Względne widmowe współczynniki odbicia dla kilku powierzchni przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Względny rozkład widmowego współczynnika odbicia podłoża, gdzie: 1 – śnieg, 2 – trawa, 3 – gleba, 4 – asfalt, 5 – beton

Asfalt i śnieg charakteryzuje się quasi achromatyczną wartością współczynnika odbicia. Jedynie w przypadku

trawy następuje zwiększenie wartości tego współczynnika dla barwy czerwonej w porównaniu do innych długości fali.

Rozsyły strumienia świetlnego opraw oświetleniowych (które poddano analizie) opisano krzywymi światłości, przy użyciu równań matematycznych. Równania te zaprezentowano w tabeli 3 oraz tabeli 4.

Tabela 3. Parametry opisujące rozsył strumienia świetlnego idealnej oprawy oświetleniowej typu kula mleczna (latarnia nr 1)

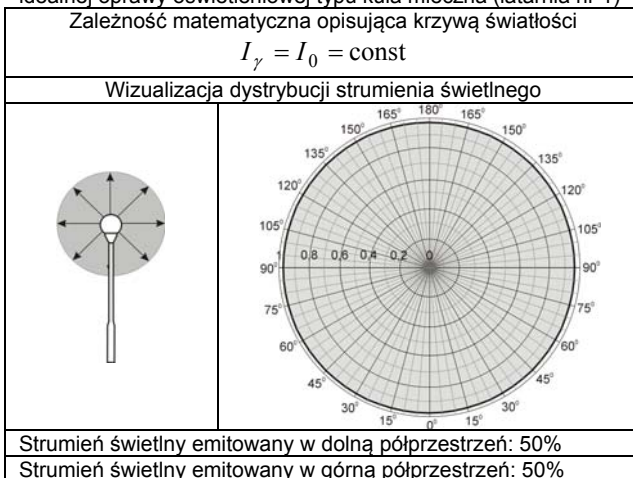
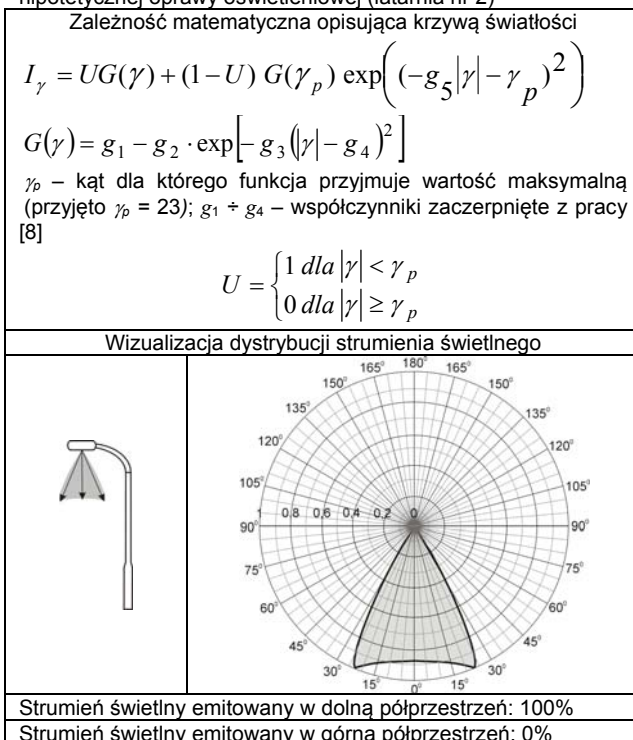


Tabela 4. Parametry opisujące rozsył strumienia świetlnego hipotetycznej oprawy oświetleniowej (latarnia nr 2)

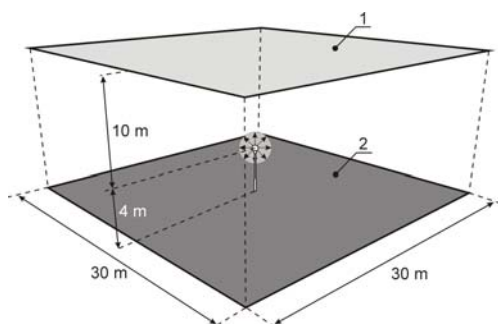


Wizualizacja symulowanej sceny oświetleniowej w oprogramowaniu DIALux

Oprawę oświetleniową zainstalowano na wysokości 4 m (rys. 3). Jest to typowa wysokość w przypadku latarni lokalizowanych w parkach jak i na niektórych ulicach i placach (ulice w dzielnicach willowych, place i ulice staromiejskie). Słup wraz z oprawą umiejscowiono w centrum kwadratowego podłoża (o długości boku 30 m).

Aby wykonać obliczenia oświetleniowe, z zastosowaniem wybranych uprzednio opraw, wygenerowano pliki z danymi fotometrycznymi [9] tj. z rozszerzeniem LDT wymaganym przez DIALux. Dane wejściowe do tych plików wyznaczono na podstawie

zależności matematycznych opisujących krzywą światłości danej oprawy (tab.3, tab. 4). Założono, że strumień świetlny oprawy wynosi 7300 lm, a bryła fotometryczna wykazuje symetrię obrotową.



Rys. 3. Widok latarni na podłożu, gdzie: 1 – siatka obliczeniowa (powierzchnia testowa), 2 - podłoże

Program komputerowy DIALux umożliwia wprowadzanie zmian rodzaju podłoża na którym zainstalowano latarnię poprzez zmianę wartości całkowitego współczynnika odbicia. Zgodnie z zaleceniem zawartym w publikacji "Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution" [10], siatkę obliczeniową (2) umiejscowiono równolegle do podłoża (1) na 10 m nad latarnią. Do wyznaczania wartości natężenia oświetlenia przyjęto 5626 równomiernie rozmieszczonych na powierzchni tej siatki punktów obliczeniowych (odstęp między punktami wynosił 0,4 m).

Wyniki obliczeń wartości natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej

W wyniku przeprowadzonych obliczeń w programie komputerowym DIALux, dla poszczególnych latarni ulokowanych na różnych podłożach, uzyskano rozkłady natężenia oświetlenia na siatce obliczeniowej umieszczonej nad oprawą.

Na podstawie wartości natężenia oświetlenia w poszczególnych punktach (oczkach) siatki obliczeniowej obliczono względne wartości [%] natężenia oświetlenia (tabela 5), przy przyjęciu jako odniesienia wartości natężenia oświetlenia przy umieszczeniu oprawy na glebie. Wyniki te nie uwzględniają rozkładu widmowego źródła światła, a jedynie jego strumień świetlny, ponieważ DIALux nie uwzględnia w swoich obliczeniach zależności widmowych. W związku z tym, że zanieczyszczenie światłem jest ściśle związane z rozkładem widmowym używanej lampy kontynuowano obliczenia tak, aby wyznaczyć zależność zanieczyszczenia światłem nieboskłonu od rodzaju użytkowanej lampy (jej względnego rozkładu widmowego mocy promienistej).

Tabela 5. Względne wartości natężenia oświetlenia na powierzchni testowej, przy przyjęciu jako odniesienia wartości przy lampie o tym samym strumieniu świetlnym umieszczonej na asfalcie

Latarnia	Rodaj podłoża				
	śnieg	trawa	gleba	asfalt	beton
nr 1	164%	104%	101%	100%	103%
nr 2	1063%	168%	123%	100%	148%

Zależność zanieczyszczenia światłem nieboskłonu od rodzaju lampy

Istnieją możliwości jakościowego oraz ilościowego opisywania zjawiska zanieczyszczenia światłem. Do oceny jakościowej stopnia zanieczyszczenia nocnego nieba używane są dziesięciostopniowa skala Bortle'a oraz sześciostopniowa skala Berry'ego. W skali Bortle'a klasa

pierwsza oznacza doskonale ciemne niebo, natomiast klasa najwyższa tj. dziewiąta charakteryzuje bardzo jasne niebo, na którym gwiazdy tworzące charakterystyczne figury gwiazdozbiorów w ogóle nie są widoczne. Taka sytuacja ma miejsce zwykle w centrum miast. Natomiast w skali Berry'ego, poziom pierwszy oznacza ciemne niebo, na którym dobrze widoczne są gęsto rozmieszczone gwiazdy aż po horyzont, a ostatni stopień jest jego przeciwieństwem tzn. niebo jest jasne a gwiazdy są słabo widoczne. Obie te metody mają jednak charakter subiektywny albowiem w dużej mierze zależą od indywidualnych cech (zdolności) narządu wzroku obserwatora. W związku z tym zostały opracowane i przedstawione w publikacjach ilościowe metody oceny zanieczyszczenia światłem. Znanych jest wiele modeli matematycznych umożliwiających modelowanie zanieczyszczenia światłem nieboskłonu. Większość z nich jest bardzo skomplikowana i wymaga znajomości zagadnień dotyczących fizyki atmosfery. W tych modelach uwzględnia się rozproszenie światła typu Rayleigh'a (na cząstkach aerozolu powietrza o rozmiarach mniejszych od długości fali λ) i typu Mie (na cząstkach większych od długości fali), którego wartość praktyczne nie zależy od długości fali. W pracy „Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow” [11] A. Bierman z Lighting Research Center z Rensselaer Polytechnic Institute, USA opisał prostą metodę matematycznego modelowania zanieczyszczenia nieboskłonu światłem. Rozproszenie typu Rayleigh'a jest ściśle związane z długością fali rozchodzącego się promieniowania. Zgodnie z teorią Rayleigh'a niespolaryzowana wiązka światła o monochromatycznej mocy promienistej P_0 w odległości r jest rozpraszana $P(\theta)$ zgodnie z zależnością 2.

$$(2) \quad P(\theta) = P_0 \frac{\pi^2 g^2 m (1 + \cos^2 \theta) (n^2 - 1)^2}{r^2 \lambda^4}$$

gdzie: g - objętość cząstek, n - współczynnik załamania, m - liczba rozpraszanych cząsteczek, θ - kąt rozproszenia nie zależny od długości fali.

W określonych warunkach atmosferycznych parametry równana 1 oprócz mocy promienistej P_0 i długości fali λ są wielkościami stałymi. Ponadto, w związku z tym że kąt rozproszenia θ nie jest zależny od długości fali można równanie 2 zapisać w postaci 3, gdzie wielkości stałe są oznaczone jako stała k . W związku z czym, przy stałych warunkach atmosferycznych, wielkość tego rozproszenia zależy od czynnika λ^{-4} znanego jako współczynnik rozproszenia Rayleigh'a.

$$(3) \quad P(\lambda) = P_0(\lambda) \frac{k}{\lambda^4}$$

W celu określenia zanieczyszczenia światłem pochodzącego od danej lampy (charakteryzującej się złożonym rozkładem widmowym) należy scałkować zależność 3 po długości fali λ .

$$(4) \quad P = k \int_{380}^{780} \frac{P_0(\lambda)}{\lambda^4} d\lambda$$

W związku z tym ewidentnym jest fakt, że zanieczyszczenie światłem będzie zależne od charakteru rozkładu widmowego używanego źródła tj. od typu lampy.

Wielkość rozproszenia Rayleigh'a może też być określana w zależności od warunków obserwacji np. mezopowych Φ_m poprzez wymnożenie mocy promienistej P_o przez mezopową czułość widmową ludzkiego oka dotyczących określonych zmierzchowych warunków widzenia:

$$(5) \quad \Phi_{m \text{ lampa}} = k \int_{380}^{780} \frac{P_o(\lambda) V_m(\lambda)}{\lambda^4} d\lambda$$

W celu porównania zanieczyszczenia światłem generowanego przez lampy o różnych rozkładach widmowych można posłużyć się zależnością 6.

$$(6) \quad \frac{\Phi_{m \text{ lampa 1}}}{\Phi_{m \text{ lampa 2}}} = \frac{\int_{380}^{780} \frac{P_o(\lambda)_{\text{lampa 1}}}{\lambda^4} V_m(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \frac{P_o(\lambda)_{\text{lampa 2}}}{\lambda^4} V_m(\lambda) d\lambda}$$

Wyniki obliczeń

Korzystając z zależności 6 dokonano obliczeń (tab. 6), dzięki którym można przeanalizować stopień zanieczyszczenia światłem generowanego przez lampę MH i źródło LED w stosunku do lampy HPS.

Następnie porównano zanieczyszczenia światłem lampy MH i źródła LED w stosunku do lampy HPS, przy założeniu że dana latarnia (z oprawą o określonej krzywej światłości) jest umiejscowiona na podłożu w postaci asfaltu. Zestawienie wynikające z tego porównania zostało zamieszczone w tabeli 7 oraz w tabeli 8.

Tabela 6. Porównanie zanieczyszczenia światłem pochodzącego od światła wybranych lamp

Źródło światła	Odbierana barwa światła	Względne zanieczyszczenie [%]
HPS	pomarańczowa	100
MH	biała	171
LED	zimno biała	199

Tabela 7. Porównanie [%] zanieczyszczenia światłem pochodzącego od różnych lamp, do zanieczyszczenia generowanego latarnią 1 z lampą HPS umieszczoną na asfalcie

Źródło światła	Rodaj podłoża				
	śnieg	trawa	gleba	asfalt	beton
HPS	171,95	100,29	100,08	100	100,38
MH	293,75	171,01	170,53	170,56	171,17
LED	343,26	199,88	199,17	199,25	199,95

Unormowanie wyników obliczeń względem lampy HPS wynika z faktu, że źródła te nadal znajdują bardzo powszechne zastosowanie w oświetleniu zewnętrznym. Często takie instalacje są modernizowane na bardziej energooszczędne i źródła HPS są wymieniane np. na LED-y. Niniejsze zestawienie daje odpowiedź jak taka modernizacja będzie wpływała na efekt zanieczyszczenia nieboskłonu światłem przy uwzględnieniu różnych podłoży znajdujących się pod latarnią. Przy przyjęciu jako odniesienia lampy HPS zlokalizowanej na podłożu asfaltowym, w przypadku zmiany w kuli mlecznej źródła światła na LED-owe zanieczyszczenie nieboskłonu światłem zwiększy się prawie dwukrotnie.

Tabela 8. Porównanie [%] zanieczyszczenia światłem pochodzącego od różnych lamp, do zanieczyszczenia generowanego latarnią 2 z lampą HPS umieszczoną na asfalcie

Źródło światła	Rodaj podłoża				
	śnieg	trawa	gleba	asfalt	beton
HPS	8047	134	110	100	146
MH	13766	214	158	160	235
LED	16091	260	179	186	272

Wnioski

Zanieczyszczenie nieboskłonu światłem zależy zarówno od rodzaju zastosowanego źródła światła jak i rodzaju (krzywej światłości) oprawy oświetleniowej oraz właściwości refleksyjnych podłoża na którym dana lampa jest umiejscowiona. Należy zwrócić uwagę, że przy zmianie źródła światła z HPS na LED-owe zanieczyszczenie nieboskłonu światłem, nawet w przypadku latarni świecących jedynie w dolną półprzestrzeń wzrasta 2 krotnie. W związku z tym zarówno przy modernizacji jak i podczas projektowania nowych instalacji oświetlenia zewnętrznego, poza walorami estetycznymi i minimalizacją kosztów związanych z zużyciem energii elektrycznej na cele oświetleniowe, należy brać pod uwagę także aspekt zanieczyszczenia nieboskłonu światłem.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/4/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNIŚW

Autorzy: dr hab. inż. Irena Fryc, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45d, E-mail: i.fryc@pb.edu.pl; dr inż. Przemysław Tabaka, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: przemyslaw.tabaka@wp.pl

LITERATURA

- [1] Polska Norma PN-EN 12464:2008 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz, PKN, Warszawa, 2008
- [2] Polska Norma PN-71/E 02034 Oświetlenie elektryczne terenów budowy, przemysłowych, kolejowych i portowych oraz dworców i środków transportu publicznego, PKN, Warszawa
- [3] Polska Norma PN-EN 12193:2008 Światło i oświetlenie - Oświetlenie w sporcie, PKN, Warszawa, 2008
- [4] Polska Norma PN-EN 12193:2008 Światło i oświetlenie - Oświetlenie w sporcie, PKN, Warszawa, 2008
- [5] Raport Techniczny CIE S 015/E:2005 Lighting of Outdoor Work Places, CIE, Vienna, 2005
- [6] Raport Techniczny CIE 115-2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic, CIE, Vienna, 2010
- [7] PKN-CEN/TR 13201-1:2016-03 Oświetlenie dróg - Część 2: Wymagania eksploatacyjne
- [8] Moreno I., Avendaño-Alejo M., Saucedo-A T., A.: Bugarin Modeling LED street lighting. *Applied Optics* Vol. 53, No. 20 / 10, s. 4420-4430. 2014
- [9] Tabaka P., Fryc I.: Zależność poziomu zanieczyszczenia otoczenia światłem od kształtu krzywej światłości użytkowanej oprawy oświetleniowej. *Kosmos* T. 64, nr 4, s. 669-677. 2015.
- [10] Brons J.A., Bullough J.D., Rea M.S.: Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution. *Lighting Res. Technol.* 40: s. 201-224. 2008
- [11] Bierman A.: Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow. *Lighting Res. Technol.* 44: s. 449-458. 2012