

УДК 514.18

**АНАЛІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ЯСКРАВОСТІ
ДОВІЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА НЕБОЗВОДУ ДО ЯСКРАВОСТІ В
ЗЕНІТІ, НАВЕДЕНОГО В ДСТУ ISO 15469:2008**

Пугачов Є.В., д.т.н.,

pev1957@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4771-0942

Літніцький С.І., к.т.н.,

gavran88@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4962-7800

Кундрат Т.М., к.т.н.,

kundratt@i.ua, ORCID: 0000-0001-9345-3161

Зданевич В.А.,

vasyl.zdanevych@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9875-8463

Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне, Україна)

В статті проведено аналіз визначення відношення яскравості довільного елемента небозводу до його яскравості в зеніті, наведеного в ДСТУ ISO 15469:2008. «Розподіл яскравості денного світла просторовий. Стандартне хмарне та безхмарне небо згідно з CIE (ISO 15469:2004, IDT)». Даний стандарт був створений на основі закордонного аналогу CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004(E). «Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky». В стандартах розглядаються 15-ть математичних моделей типів небозводів, які є вихідною інформацією для моделювання природної освітленості та інших характеристик світлового поля. Оскільки стандарти є ще відносно новими, вони потребують додаткового аналізу. В статті було показано, що у випадку розташування елемента небозводу у зеніті формула для визначення відношення яскравості довільного елемента небозводу до яскравості в зеніті значно спрощується.

Автори задалися конкретними вихідними даними і підставили їх у розглянуті формули, а отримані результати проілюстрували у вигляді поверхонь яскравості небозводу у сферичних координатах.

Широта дорівнювала $50,623^{\circ}$ (широта міста Рівне), сонячний час відповідав сонячному полудню, день року – 81-ий (22 березня). Ці вихідні дані були використані для усіх 15-ти математичних моделей типів небозводів, а результати показані для трьох характерних типів небозводів: першого, четвертого і п'ятнадцятого.

Аналіз виявив, що поверхня яскравості для першого типу небозводу є поверхнею обертання, і яскравість у зеніті не осцилює. Для інших двох поверхонь значення яскравості у зеніті навпаки – осцилює. Поверхні яскравості для третього і п'ятого типів небозводу теж є поверхнями обертаннями без осциляцій. Тому для решти дванадцяти типів небозводів

автори запропонували апроксимувати осцилюючу точку.

Така апроксимація дозволить коректно обчислювати яскравість для математичних моделей типів небозводів з осциляцією, що сприятиме вирішуванню різноманітних світлотехнічних задач, наприклад, моделюванню природнього освітлення для світлопрорізів різних конфігурацій.

Ключові слова: градація яскравості, зеніт, індикатриса розсіювання, кутова висота, небозвід, осциляція, Сонце, яскравість.

Постановка проблеми. Природне освітлення відіграє дуже важливу роль у житті людини. Його недостатня кількість або відсутність не лише руйнівним чином впливає на здоров'я людини, а й створює різні незручності майже у всіх сферах діяльності людства. Проте і надлишок освітлення впливає негативно. Тому розроблені різні математичні моделі розподілу яскравості за небозводом, які є вихідною інформацією для моделювання природної освітленості.

Зокрема, до 2004 року для розрахунку яскравості неба і природної освітленості та інших характеристик світлового поля використовували документ CIE S 003/E:1996 (ISO 15469:1997) «CIE standard overcast sky and clear sky» [1], який математично описував небозвід із суцільною хмарністю за формулою Муна-Спенсер:

$$\frac{L_{\gamma}}{L_z} = \frac{1 + 2 \sin \gamma}{3} = \frac{1 + 2 \cos Z}{3}, \quad (1)$$

де L_{γ} – яскравість довільного елемента небозводу, кд/м²;

L_z – яскравість в зеніті небозводу, кд/м²;

γ – кутова висота довільного елемента небозводу, рад;

Z – зенітний кут довільного елемента небозводу, рад.

Пізніше Міжнародною комісією з освітленості (МКО) був стандартизований новий документ: CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004(E)). «Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky» [2]. Аналогічний документ, а саме – ДСТУ ISO 15469:2008. «Розподіл яскравості денного світла просторовий. Стандартне хмарне та безхмарне небо згідно з CIE (ISO 15469:2004, IDT)» [3] запровадили в Україні. У цих документах вже розглядають 15-ть математичних моделей типів небозводів, а небозвід із суцільною хмарністю є лише одним із них. Оскільки ці документи ще є відносно новими, вони потребують додаткового аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різні аспекти математичних моделей типів небозводів, наведених в [2, 3], досліджувалися в роботах [4-9], але аналіз визначення відношення яскравості довільного елемента небозводу до яскравості в зеніті не розглядався.

Формулювання цілей статті. В роботі поставлено мету – провести аналіз визначення відношення яскравості довільного елемента небозводу

до яскравості в зеніті, наведеного в ДСТУ ISO 15469:2008. «Розподіл яскравості денного світла просторовий. Стандартне хмарне та безхмарне небо згідно з CIE (ISO 15469:2004, IDT)» [3].

Основна частина. Згідно з [3] відношення яскравості довільного елемента небозводу до яскравості в зеніті визначається за формулою:

$$\frac{L_\gamma}{L_Z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)}. \quad (2)$$

Функція градації яскравості φ пов'язує яскравість елемента небозводу та його зенітний кут (рис.1):

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos(Z)}\right), \text{ за } 0 \leq Z \leq \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

де a, b – параметри градації яскравості (наведені у таблиці 1 [3]);

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \text{ (на горизонті)}.$$

В (2) значення яскравості у зеніті дорівнює:

$$\varphi(0) = 1 + a \cdot \exp(b). \quad (4)$$

Функція f – це індикатриса розсіювання, що пов'язує відносну яскравість елемента небозводу з його кутовою відстанню від Сонця:

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left[\exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi, \quad (5)$$

де c, d, e – параметри індикатриса розсіювання (наведені у таблиці 1 [3]);

χ – найкоротша кутова відстань між елементом небозводу та Сонцем, рад.

Значення f у зеніті дорівнює:

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(d \cdot Z_s) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s, \quad (6)$$

де Z_s – зенітний кут Сонця, рад.

Якщо довільний елемент небозводу знаходиться у зеніті, то зенітний кут Z дорівнює нулю. Тоді у (2) в якості $\varphi(Z)$ у чисельник слід підставити $\varphi(0)$, згідно формули (4). Оскільки таке ж значення є у знаменнику, то вони скоротяться.

Позаяк χ є найкоротшою кутовою відстанню між елементом небозводу та Сонцем, то у випадку розташування довільного елемента небозводу у зеніті кутова відстань χ буде дорівнювати зенітному куту Сонця Z_s (рис. 1). Замість χ у формулу (5) підставимо Z_s . Тоді (5) буде дорівнювати (6), а $f(\chi)$ і $f(Z_s)$ у формулі (2) скоротяться.

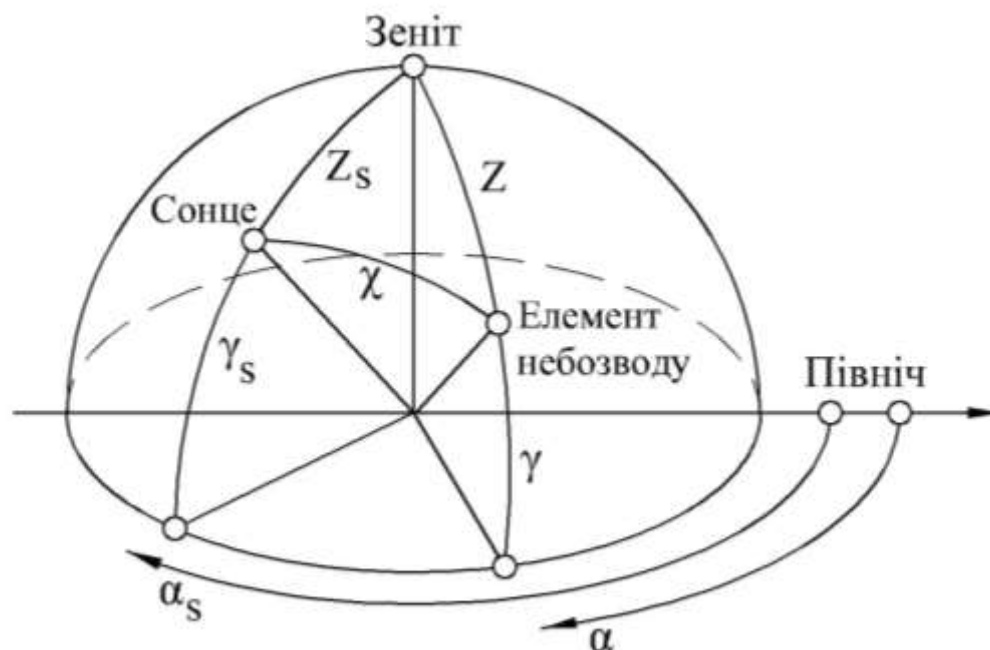


Рис. 1. Кути, що визначають положення Сонця та елемента небозводу

Якщо L_z перенесемо у праву частину (2), то це рівняння для випадку розташування елемента небозводу у зеніті набере вигляду:

$$L_\gamma = L_z . \quad (7)$$

Таким чином, якщо елемент небозводу знаходиться у зеніті, то його яскравість L_γ дорівнює яскравості в зеніті небозводу L_z , яку можна обчислити, скориставшись формулами, наведеними у [10].

Для таких вихідних даних: широта місцевості $50,623^0$ (широта міста Рівне), сонячний полудень, 81-ий день року (22 березня) були побудовані поверхні яскравості небозводу у сферичних координатах для усіх 15-ти математичних моделей типів небозводу.

У статті результати показані лише для трьох характерних типів небозводу (рис. 2-4): 1-го, 4-го і 15-го.

Як бачимо, поверхня яскравості для 1-го типу небозводу (рис. 2) є поверхнею обертання, і яскравість у зеніті не осцилює. Для інших двох поверхонь (4-го і 15-го типів, рис. 3, 4) навпаки – осцилює. Слід зазначити, що поверхні яскравості для 3-го і 5-го типів небозводу теж є поверхнями обертаннями без осциляцій. Тому пропонується для решти 12-ти типів небозводів не використовувати формулу (7), а апроксимувати осцилюючу точку. Наприклад, можна обчислити кілька значень, які знаходяться близько біля зеніту, і взяти їх середнє арифметичне значення.

На рис. 5-7 показані поверхні після апроксимації значення у зеніті.

Як бачимо з рис. 2-7, апроксимація практично не вплинула на форму поверхні обертання, але значно поліпшила ситуацію для інших двох поверхонь.

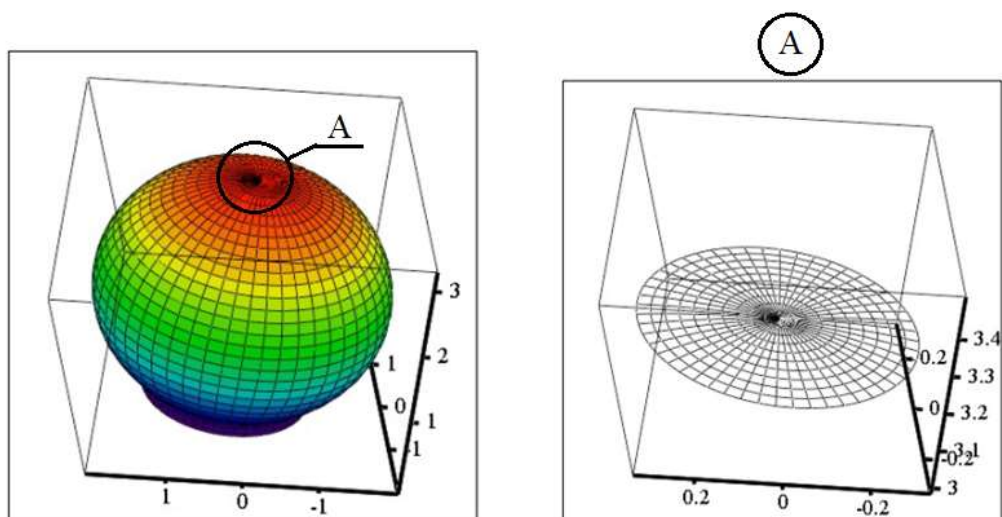


Рис. 2. Поверхня яскравості небозвуду в сферичних координатах для 1-го типу математичної моделі яскравості небозвуду

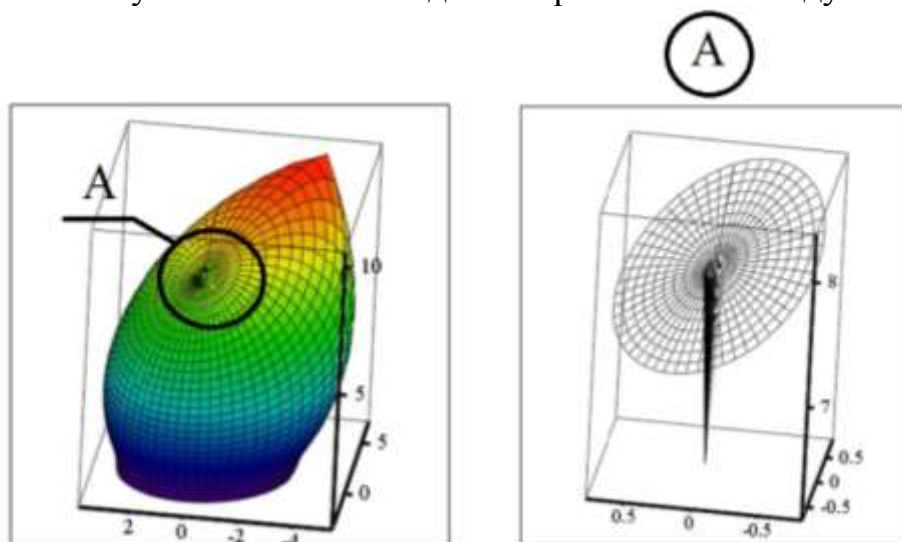


Рис. 3. Поверхня яскравості небозвуду в сферичних координатах для 4-го типу математичної моделі яскравості небозвуду

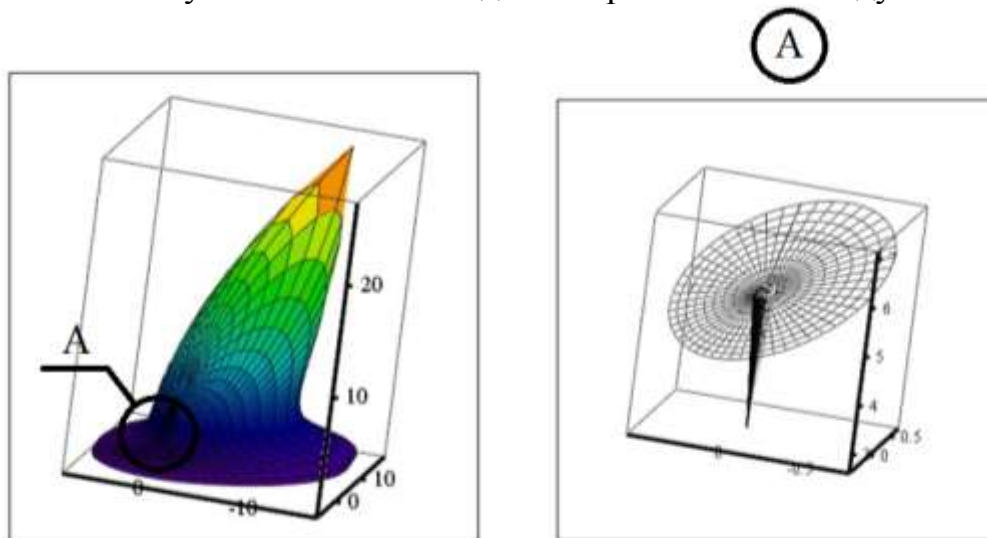


Рис. 4. Поверхня яскравості небозвуду в сферичних координатах для 15-го типу математичної моделі яскравості небозвуду

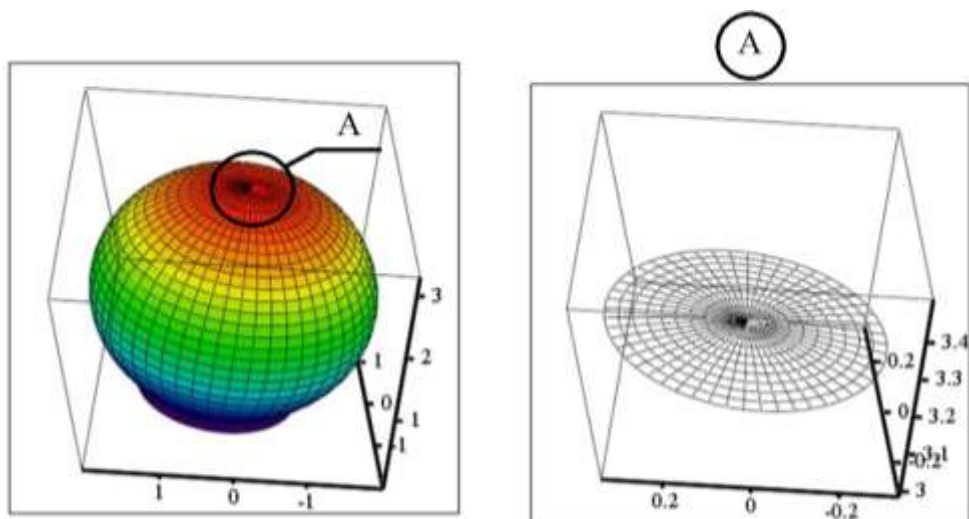


Рис. 5. Поверхня яскравості небозвуду в сферичних координатах для 1-го типу математичної моделі яскравості небозвуду після апроксимації значення у зеніті

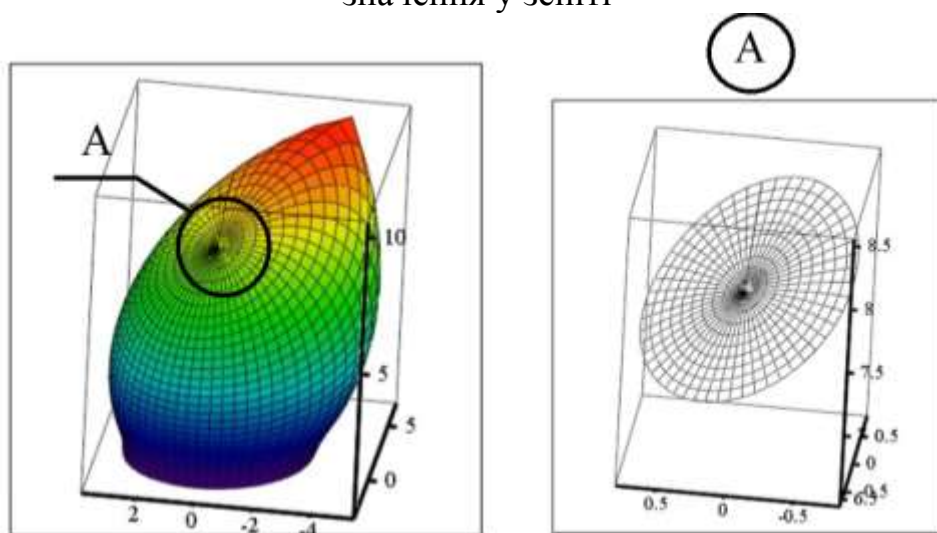


Рис. 6. Поверхня яскравості небозвуду в сферичних координатах для 4-го типу математичної моделі небозвуду після апроксимації значення у зеніті

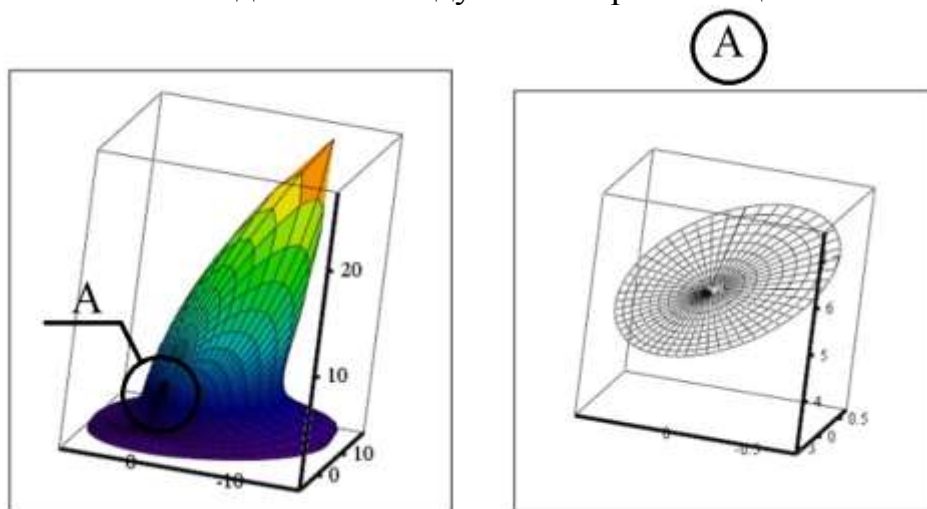


Рис. 7. Поверхня яскравості небозвуду в сферичних координатах для 15-го типу математичної моделі небозвуду після апроксимації значення у зеніті

Висновки. Проведений аналіз та запропонована апроксимація дозволить більш коректно обчислювати яскравість для усіх математичних моделей типів небозводів і допоможе вирішувати різні світлотехнічні задачі, наприклад, при моделювання природнього освітлення для світлопрорізів різних конфігурацій.

Література

1. CIE standard overcast sky and clear sky. CIE S 003/E: 1996 (ISO 15469:1997), 1997.
2. Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky. CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004(E), 2004.
3. Розподіл яскравості денного світла просторовий. Стандартне хмарне та безхмарне небо згідно з CIE (ISO 15469:2004, IDT) : ДСТУ ISO 15469:2008. Київ: Держспоживстандарт України, 2013. 7 с.
4. Радомцев Д.О. Визначення типів небосхилів для м. Києва на основі ДСТУ ISO 15469:2008 «Розподіл яскравості денного світла просторовий». *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб.* – Київ: КНУБА, 2015. – Вип. 7. – С. 248-261.
5. Радомцев Д.О. Визначення типів небозводів для території західної частини України у відповідності до ДСТУ ISO 15469:2008 «Розподіл яскравості денного світла». *Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць.* – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2015. – Вип. 4. – С. 113-119.
6. Радомцев Д.О., Сергейчук О.В. Моделювання станів небозводу на території України у відповідності до ДСТУ ISO 15469:2008 «Розподіл яскравості денного світла». *Вісник Херсонського національного технічного університету.* – Херсон: ХНТУ, 2015. – Вип. 3(54). – С. 604-609.
7. Radomtsev D., Sergeychuk O. Employment features of CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004) “CIE standard general sky” under designing systems of room daylighting. *9th International Conference on Future Generation Communication and Networking (25 - 28 November 2015, Jeju Island, South Korea)*, FGNC 2015 IEEE CPS Post Proceedings. – Jeju: SERSC, – pp.49-54, doi: 10.1109/FGNC.2015.22, ISBN 978-1-4673-9834-3/15.
8. Tregenza PR. Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies. *Lighting Research and Technology*, 36(4), 2004. P. 271-281.
9. Wittkopf SK. Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore. *Lighting Research and Technology*, 39(1), 2007. P. 31-51.
10. Kittler R., Darula S. CIE general sky standard defining luminance distribution. *Proceedings of eSim Conference*. Montreal, Canada: 2002. P. 36-43.

DEFINITION ANALYSIS OF THE RATIO OF THE LUMINANCE IN AN ARBITRARY SKY ELEMENTS TO THE ZENITH LUMINANCE GIVEN IN DSTU ISO 15469:2008

Evgen Pugachev, Serhii Litnitskyi, Taras Kundrat, Vasyl Zdanevych

The article analyzes the definition of the ratio of the luminance in an arbitrary sky elements to the zenith luminance given in DSTU ISO 15469:2008. "The distribution of daylight luminance is spatial. Standard cloudy and cloudless sky according to CIE (ISO 15469:2004, IDT)". This standard was created on the basis of a foreign analogue CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004(E). «Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky». The standards consider 15 mathematical models of types of skies, which are the source information for modeling natural illumination and other characteristics of the light field.. Since these documents are still relatively new, they require additional analysis.

In the article it was shown that in the case of the location of the element of the sky at the zenith, the formula for determining the ratio of the luminance of an arbitrary element of the sky to the luminance at the zenith is significantly simplified.

The authors set themselves specific initial data and substituted them in the considered formulas. The obtained results were illustrated in the form of sky luminance surfaces in spherical coordinates.

The latitude was equal to 50.6230 (the latitude of the city of Rivne), the solar time was equal to noon, the day of the year was set to the 81st (March 22). These raw data were used for all 15 mathematical models of sky types. The results were shown for three characteristic types of skies: the first, fourth and fifteenth.

The results showed that the luminance surface for the first type of sky is a rotation surface and the value equal to the value at the zenith does not oscillate. For the other two surfaces, this point oscillates on the contrary. The luminance surfaces for the third and fifth types of sky were also surfaces of rotations without oscillations. Therefore, for the remaining twelve types of skies, it was suggested to approximate this point.

The conducted analysis will allow correct calculation of luminance for all mathematical models of sky types. This will help solve various problems related to lighting technology. For example, when modeling the amount of day lighting for light openings of various configurations.

Keywords: angular height, luminance, luminance gradation, oscillation, scattering indicatrix, Sun, zenith.

References

1. *CIE standard overcast sky and clear sky.* (1997). CIE S 003/E:1996 (ISO 15469:1997).
2. *Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky.* (2004). CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004(E)).
3. *The distribution of daylight luminance is spatial. Standard cloudy and cloudless sky according to CIE (ISO 15469:2004, IDT): DSTU ISO 15469:2008.* (2013). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny. [in Ukrainian].
4. Radomtsev D.O. (2015) Determination of types of skies for the city of Kyiv based on DSTU ISO 15469:2008 «The distribution of daylight luminance is spatial». *Enerhoefektyvnist' v budivnytstvi ta arkhitekturi: nauk.-tekhn. zb.* – Kyiv: KNUBA, 7, 248-261. [in Ukrainian].
5. Radomtsev D.O. (2015) Determination of types of skies for the territory of the western part of Ukraine in accordance with DSTU ISO 15469:2008 «Daylight brightness distribution». *Suchasni problemy modelyuvannya: zb. nauk. prats'.* – Melitopol': MDPU im. B. Khmel'nyts'koho, 4, 113-119. [in Ukrainian].
6. Radomtsev D.O., Sergeychuk O.V. (2015) Modeling of the state of the sky on the territory of Ukraine in accordance with DSTU ISO 15469:2008 «Daylight brightness distribution». *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu.* – Kherson: KHNTU, 2015, 3(54), 604-609. [in Ukrainian].
7. Radomtsev D., Sergeychuk O. (2015) Employment features of CIE S 011/E:2003 (ISO 15469:2004) “CIE standard general sky” under designing systems of room daylighting. *9th International Conference on Future Generation Communication and Networking (25 - 28 November 2015, Jeju Island, South Korea), FGCN 2015 IEEE CPS Post Proceedings.* – Jeju: SERSC, 49-54, doi: 10.1109/FGCN.2015.22, ISBN 978-1-4673-9834-3/15.
8. Tregenza PR. (2004) Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies. *Lighting Research and Technology*, 36(4), 271-281.
9. Wittkopf SK. (2007) Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore. *Lighting Research and Technology*, 39(1), 31-51.
10. Kittler R., Darula S. (2002) CIE general sky standard defining luminance distribution. *Proceedings of eSim Conference.* Montreal, Canada: 2002, 36-43.