

**В.С. Кретулiс, I.Є. Мiнакова, П.Ф. Олексенко, В.М. Сорокин**

## **ДОСЛIДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОРЕЛЬОВАНОЇ КОЛIРНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ СВIТЛОДIОДНИХ ОСВIТЛЮВАЧIВ ПРИ ОРГАНIЗАЦIЇ ЯКIСНОГО ОСВIТЛЕННЯ АВТОМАГIСТРАЛЕЙ ЗА СКЛАДНИХ ПОГОДНИХ УМОВ**

Виконано дослідження залежності рівня відносної горизонтальної освітленості та яскравості найбільш розповсюджених в Україні типів дорожнього покриття при використанні світлодіодних освітлювачів з різним характером спектрального розподілу випромінювання в умовах наявності в атмосфері водних аерозолів різної оптичної щільності (сильних, помірних, слабких туманів та серпанку). Створено математичні моделі випромінювання світлодіодних освітлювачів з корельованою колірною температурою  $T_{cc}=(2200\div 8400)$  К у видимому діапазоні спектра  $\lambda=(380\div 780)$  нм. Їх використання разом з обраною моделлю спектральної залежності показника розсіяння  $\beta(\lambda)$  (модель Е. Фердинандова) атмосферного середовища з наявністю водних аерозолів, що зумовлюють обмежену метеорологічну дальність видимості  $MДВ=(0,1\div 3)$  км, виявило незначну (1 %) перевагу при створенні освітленості від світильників теплого спектра випромінювання ( $T_{cc}=2200$  К) порівняно з холодним ( $T_{cc}=8400$  К) для випадків сильних туманів з  $MДВ\leq 100$  м. Розрахунки з залученням до аналізу математичного моделювання спектрального розподілу коефіцієнтів відбиття двох типів дорожнього покриття (нового та зношеного асфальту) довели, що при використанні освітлювачів теплого спектра яскравість найбільш розповсюдженого в Україні старого асфальтового дорожнього покриття в умовах  $MДВ=100$  м на 5 % перевищує відповідне значення від випромінювачів холодного спектра. При покращенні видимості ця відмінність поступово зменшується за рахунок слабкішої спектральної залежності  $\beta(\lambda)$  і при  $MДВ=3$  км складає 4,5 %. Перевага використання освітлювачів теплого спектра значно посилиться для випадку оцінювання яскравості покриття на протяжних відстанях, наприклад, злітно-посадкових смугах аеропортів, що буде сприяти суттєвому покращенню безпеки польотів.

**Ключові слова:** світлодіодний освітлювач, корельована колірна температура, освітленість, яскравість, дорожнє покриття, коефіцієнт відбиття, метеорологічна дальність видимості.

### **1. ВСТУП**

Останнім часом світлодіодні прилади як сучасні високоефективні засоби знаходять широке застосування при вирішенні задач освітлення автодоріг і вулиць із забезпеченням сприятливих умов видимості в темний час доби. На маркеті освітлювальних послуг представлений широкий асортимент світлодіодних освітлювачів, що відрізняються величинами світлового потоку, світловою віддачею, індексом передачі кольору, колірною температурою тощо.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що при цьому в основній масі публікацій світлотехнічні параметри освітлення дорожнього покриття розглядаються і досліджуються в нормальних умовах ясної погоди [1]. Урахування впливу атмосферних станів на дорозі (туман, серпанок, мряка) з метою встановлення відповідності вимогам якісного освітлення і безпеки руху при використанні світлодіодних дорожніх освітлювачів з різним характером спектрального розподілу потужності випромінювання раніше не розглядалося.

Науково-технічне значення даної роботи полягає в тому, щоб дослідити поведінку рівня відносної горизонтальної освітленості та яскравості найбільш розповсюджених типів дорожнього покриття при використанні світлодіодних світильників з варійованою корельованою колірною температурою в різних погодних умовах для покращення безпечного руху автотранспорту.

## 2. МАКЕТНО-ВИПРОБУВАЛЬНА МОДЕЛЬ ОСВІТЛЮВАНОЇ АВТОМАГІСТРАЛІ

Головним фактором, що обмежує видимість на автомагістралях, є наявність у приземному шарі атмосфери водних дисперсних аерозолів, які представлені поземними туманами на рівні 2 м над дорогою з горизонтальною видимістю біля 1000 м та менше. З метою моделювання та дослідження параметрів освітлювання ділянки дороги в умовах сильних туманів різної водності було створено макетно-випробувальну фотометричну камеру.

Проектування моделі ділянки дороги з дослідження впливу спектрального розподілу світлодіодного випромінювання дорожніх освітлювачів на забезпечення освітлення дорожнього покриття в умовах обмеженої видимості проведено при мінімальному масштабному співвідношенні (приблизно 1:10) відстані «світлодіодний освітлювач – дорожнє полотно», при якому можлива реалізація атмосфери штучного туману заданої оптичної щільності у фотометричній камері та високої розподільної спроможності вимірювання його спектрофотометричних характеристик.

Обладнання фотометричної макетно-випробувальної моделі-камери з корисним об'ємом 0,14 м<sup>3</sup> містить джерело випромінювання (галогенна лампа для оцінювального вимірювання з випромінюванням в спектральній області довжин хвиль  $\lambda$  всього видимого діапазону або світлодіодні освітлювачі теплового та холодного спектра з корельованою колірною температурою  $T_{CC}=2200$  К та  $T_{CC}=8300$  К відповідно), що керується програмованим джерелом живлення постійного струму LED-300 Е, генератор штучного туману (ультразвуковий небулайзер) з продуктивністю аерозольних крапель вологи з медіанним діаметром 5÷8 мкм та фотоприймальний пристрій високоточного автоматичного матричного спектро радіометра EVERFINE HAAS-2000. Для запобігання перевідзеркалення і фонового засвічення фотоприймального модуля нефелометра внутрішні стінки фотометричної камери обшиті світлопоглинаючим матеріалом, а випромінювання тестуючого галогенного освітлювача збирається оптичною системою у колімований пучок діаметром 4 см.

Метеорологічна дальність видимості (МДВ) в камері у моменти часу  $t$  визначалась згідно з [2] за значеннями показника розсіяння  $\beta$  як  $МДВ(\lambda, t) = 3/\beta(\lambda, t)$ . З урахуванням відсутності поглинання випромінювання видимого діапазону водними аерозолями, показник розсіяння розраховувався за співвідношенням, що походить з закону Бугера-Ламберта [3]:

$$\beta(\lambda, t) = -\frac{\ln[\tau(\lambda, t)]}{l},$$

$$\tau(\lambda, t) = F(\lambda, t)/F_0,$$

де  $\tau(\lambda, t)$  – коефіцієнт пропускання для обраної довжини хвилі  $\lambda$  в момент часу  $t$ ;

$F(\lambda, t)$  - світловий потік, зареєстрований фотоприймальним пристроєм в момент часу  $t$ ;

$F_0$  – світловий потік, зареєстрований фотоприймальним пристроєм у момент вмикання небулайзера  $t=0$  і початку наповнення камери туманом;

$l=0,9$  м – відстань між джерелом та приймачем випромінювання.

Зразок ділянки часової залежності коефіцієнта пропускання випромінювання галогенної лампи в макетно-випробувальній камері штучного туману для трьох обраних значень довжини хвилі, що відповідають областям теплового ( $\lambda=650$  нм) та холодного ( $\lambda=460$  нм) спектра видимого діапазону, а також  $\lambda=550$  нм для розрахунків  $\beta(550, t)$  і  $МДВ(550, t)$ , наведено на рис.1 (час  $t=1500$  с відповідає моменту вмикання небулайзера).

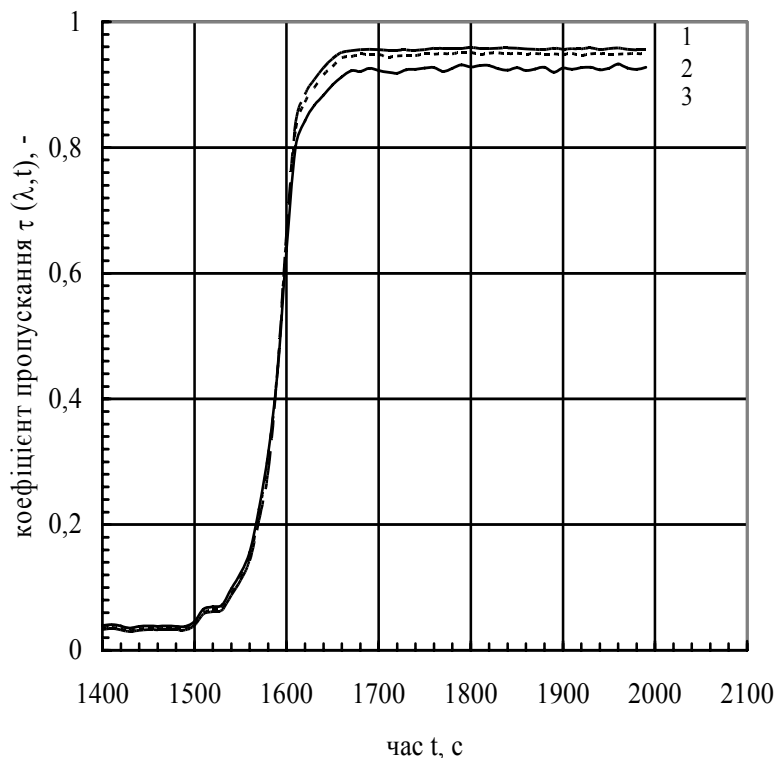


Рис.1. Часові залежності коефіцієнтів пропускання випромінювання для обраних довжин хвиль галогенної лампи в камері моделювання водних атмосферних аерозолів в процесі деградації туману ( $t > 1500$  с): 1 –  $\lambda=650$  нм; 2 –  $\lambda=550$  нм; 3 –  $\lambda=460$  нм.

Визначені значення МДВ на горизонтальних ділянках залежностей (рис.1) відповідають умовам дуже сильного (МДВ складає декілька метрів) та сильного (МДВ $\approx 100$  м) туманів. При найгірших умовах видимості ( $t < 1500$  с) з дуже невеликою перевагою в  $\approx 1$  % краще розповсюджується короткохвильове (синє) випромінювання, з покращенням видимості ослаблення випромінювання всього видимого спектра вирівнюється ( $t=1590$  с, МДВ $\approx 40$  м), в середовищі сильного туману з МДВ $\approx 100$  м перевагу на рівні 3 % має довгохвильове (червоне) випромінювання. Для світлодіодних освітлювачів, спектр випромінювання яких охоплює весь видимий діапазон, відмінності проходження випромінювання крізь сильний туман (МДВ $\approx 100$  м), враховуючи дуже невелику базу випробувальної камери  $l=0,9$  м, ще більш невиразні і складають менше за відсоток з перевагою освітлювача теплого спектра з  $T_{CC}=2200$  К.

Дослідження поведінки рівня відносної горизонтальної освітленості дорожнього покриття при використанні світлодіодних світильників з варійованою корельованою колірною температурою бажано подовжити за умов сильного туману меншої водності (МДВ=100÷200 м), помірного (МДВ=200÷500 м), легкого туману (МДВ до 1000 м) і серпанку. Але труднощі зі створенням в макетно-випробувальній камері стабільних умов, що відповідають МДВ $>100$  м, через швидкі процеси деградації туману змушують звернутись до аналітичних методів і алгоритмів проведення таких досліджень.

### **3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОСВІТЛЕННЯ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ВІД СВІТЛОДІОДНИХ ОСВІТЛЮВАЧІВ З $T_{CC} = 2200 \div 8400$ К ЗА УМОВ ВОДНИХ АТМОСФЕРНИХ АЕРОЗОЛІВ РІЗНОЇ ОПТИЧНОЇ ЩІЛЬНОСТІ**

В якості освітлювачів при створенні математичної моделі освітлення дорожнього полотна обрано дев'ять світлодіодних приладів з різною корельованою колірною температурою  $T_{CC}$  в діапазоні від 2200 К до 8400 К. Для всіх освітлювачів у видимому діапазоні довжин хвиль експериментально визначено спектральний розподіл потужності випромінювання за умов доброї видимості, а також основні характеристичні параметри

спектрів: домінуючу довжину хвилі випромінювання  $\lambda_d$ , пікову довжину хвилі випромінювання  $\lambda_p$ , координати кольоровості колірної діаграми міжнародної комісії з освітлення (МКО) 1931 р.  $x, y$ , координати кольоровості колірної діаграми МКО 1976 р.  $u', v'$  та індекс передачі кольору  $R_a$  (табл.1). Розраховані значення повної інтегральної потужності випромінювання  $\Sigma P_i$  в спектральному діапазоні довжин хвиль  $\lambda_i=(380\div 780)$  нм з кроком 0,1 нм, повної потужності випромінювання з урахуванням фотопічної функції  $V_i$  видимості  $\Sigma(P_i \cdot V_i)$  та світлового потоку  $F$ . Для подальшого коректного порівняльного аналізу освітленості від освітлювачів різної  $T_{cc}$  світловий потік нормувався за значенням 952 лм (відповідає освітлювачу №5 з приблизно середнім значенням світлового потоку).

На основі отриманих експериментальних даних для обраних світлодіодних освітлювачів виконано аналітичне моделювання спектрального розподілу променистого потоку у видимій частині спектра. Слід відзначити, що спектри всіх світлодіодних приладів є залежностями складної форми з двома максимумами в короткохвильовій ( $\lambda \approx 450$  нм) та більш довгохвильовій ( $\lambda \approx 580\div 620$  нм) частині видимого діапазону, поєднаними між собою мінімальним значенням променистого потоку при  $\lambda=480$  нм. Амплітуда, симетричність та протяжність максимумів варіюються для кожного освітлювача. Зважаючи на таку форму залежності, при моделюванні спектр випромінювання було розбито на 2 ділянки –  $\lambda=(380\div 480)$  нм та  $\lambda=(481\div 780)$  нм, для кожної з яких обиралася своя аналітична модель. Найбільш вдалимими з високими значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації  $R^2 > 0,99$  виявилися моделі для освітлювача №3 з  $T_{cc}=3054$  К у вигляді поліномів шостого порядку.

Проте через складну форму спектральної залежності випромінювання досягти високого ступеня достовірності та відповідності експериментальним даним з повного променистого потоку для кожного з світлодіодних випромінювачів, навіть з використанням декількох складних поліноміальних моделей високих порядків, виявилось неможливим. В такій ситуації досягнення встановленої цілі досліджень реалізовано за рахунок використання таблично-числового подання спектральної щільності променистого потоку світлодіодних випромінювачів, віднесеної до 1 нм, в межах спектрального інтервалу від 380 нм до 780 нм.

При переході від умов доброї видимості до обмеженої завдяки наявності в атмосфері водних аерозолів різної оптичної щільності треба враховувати залежність показника розсіяння  $\beta$  атмосферного середовища від довжини хвилі  $\lambda$  випромінювання освітлювачів, яка впливає на значення спектрального світлового потоку  $F(\lambda, l)$  на відстані  $l$  від освітлювача з потоком випромінювання  $F_0(\lambda)$  згідно із законом Бугера-Ламберта [3]:

$$F(\lambda, l) = F_0(\lambda) \cdot \exp[-\beta(\lambda) \cdot l].$$

Таблиця 1. Характеристичні параметри спектрів потужності світлодіодних випромінювачів з різною корельованою колірною температурою

№ освітлювача	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{cc}$ , К	2200	2731	3054	4119	4407	5563	5979	6901	8367
$\lambda_d$ , нм	587,6	583,5	582,5	577,6	576,6	542,8	496,1	487,6	481,7
$\lambda_p$ , нм	604,2	604,9	593,9	593,9	449,4	451,8	454,2	456,2	454,6
$x$	0,5042	0,4606	0,4337	0,3764	0,3446	0,331	0,3222	0,3079	0,2913
$y$	0,4123	0,5295	0,4039	0,3781	0,3866	0,3445	0,3371	0,3255	0,3029
$u'$	0,2906	0,2606	0,2486	0,2219	0,2179	0,2046	0,2013	0,1958	0,1926
$v'$	0,5348	0,5295	0,5208	0,5016	0,4965	0,4791	0,474	0,4657	0,4504
$R_a$	67,5	81,9	72,0	83,1	73,1	73,8	84,5	85,7	81,1
$\Sigma(P_i)$ , Вт	13,48	2,57	2,79	1,87	2,85	3,81	2,61	2,88	0,88
$\Sigma\{(P_i) V_i\}$ , Вт	6,61	1,22	1,40	0,90	1,39	1,81	1,19	1,25	0,38
$F$ , лм	4517	833	958	612	952	1236	812	861	257
$K_{norm}$ до 952 лм	0,211	1,14	0,994	1,56	1,00	0,770	1,17	1,11	3,70

При виконанні роботи розглянуто декілька математичних моделей спектральної залежності показника розсіяння  $\beta$ , що відрізняються діапазоном застосовності по метеорологічній дальності видимості та довжині хвилі. Так, П.Круз [4] визначив модель для  $\beta$  [км<sup>-1</sup>] у вигляді:

$$\beta(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left( \frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q},$$

$$q = 0,585 V^{1/3},$$

де  $V$  – метеорологічна дальність видимості, км;

$\lambda$  – довжина хвилі, мкм;

і довів її справедливості при  $V < 6$  км та  $0,55 < \lambda < 6$  мкм.

І.Кім [5] виконав уточнення значень  $q$  для серпанку ( $1 < V < 6$  км), легкого туману ( $0,5 < V < 1$  км) та помірного туману ( $V < 0,5$  км), але дійсність моделі, як і у П.Крузе, не розповсюджується на весь видимий діапазон довжин хвиль.

Тому як робочу обрано модель Е.Фердінандова [6] (рис.2), яка дійсна для  $\lambda = (0,3 \div 1,1)$  мкм та може застосовуватися при різних погодних умовах - від сильного туману ( $V = 0,1$  км) до серпанку і ідеальної видимості в 50 км:

$$\beta(\lambda) = (-2,656 \ln(\lambda) + 2,499) \cdot V^{Q(\lambda)},$$

$$Q(\lambda) = 0,199 \cdot \ln(\lambda) + 1,157.$$

Аналіз результатів математичного моделювання освітлення дорожнього полотна виявив дуже незначну перевагу використання світлодіодних випромінювачів теплого спектра в умовах сильного туману МДВ=100 м при висоті встановлення освітлювачів  $l = 10 \div 20$  м. Відносна освітленість дороги від освітлювачів з корельованою колірною температурою  $T_{cc} = 2200$  К приблизно на відсоток перевищує відповідне значення порівняно з  $T_{cc} = 8400$  К. При покращенні видимості ця відмінність швидко зменшується (0,3 % при МДВ=300 м) і для МДВ > 1 км практично відсутня (<0,1 %).

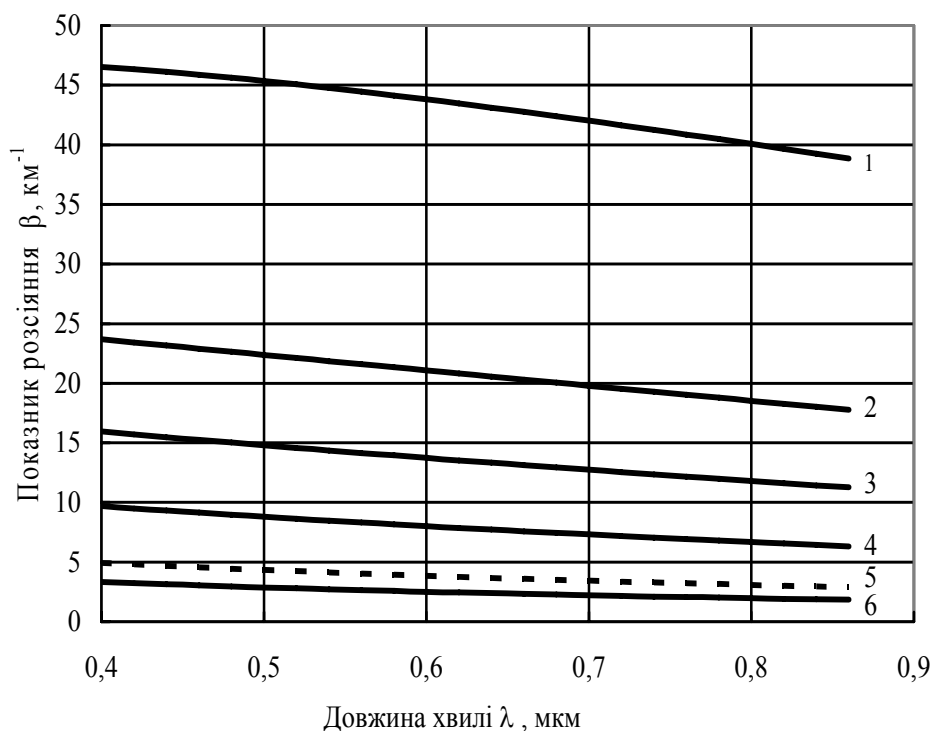


Рис.2. Спектральна залежність показника розсіяння (модель Е.Фердинандова) в умовах різної метеорологічної дальності видимості: 1 – 0,1 км; 2 – 0,2 км; 3 – 0,3 км; 4 – 0,5 км; 5 – 1 км; 6 – 1,5 км.

#### 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯСКРАВІСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СВІТЛОДІОДНИХ ОСВІТЛЮВАЧІВ З РІЗНОЮ $T_{cc}$ ЗА УМОВ АТМОСФЕРНИХ ТУМАНІВ

Оскільки око спостерігача сприймає освітленість об'єктів через їхню яскравість, то для забезпечення якісного комфортного освітлення при русі водіїв та пішоходів крім рівня освітленості слід враховувати яскравість дорожнього полотна  $L(\lambda, \beta)$ , яка додатково визначається спектральною залежністю коефіцієнта відбиття покриття  $\rho(\lambda)$ . Це багатопараметрична функція характеристик матеріалу та текстури, кольору та світлоти дорожнього полотна, ступеня його зносу, чистоти та вологості поверхні. Питання встановлення характеру цієї залежності для доріг з різними типами покриття є необхідним етапом дослідження оптимізації освітлення доріг світлодіодними освітлювачами різного спектра випромінювання.

В роботі [7] наведені експериментальні результати вимірювання відносного спектрального коефіцієнта відбиття для декількох типів покриттів доріг і тротуарів, серед яких найбільш розповсюдженими в Україні є щебнемастикові суміші (нове асфальтобетонне покриття за ДСТУ Б В.2.7-119-2011 та зношене асфальтобетонне покриття за ДСТУ Б В.2.7-127-2006). Для цих типів дорожнього полотна нами виконано математичне моделювання спектрального розподілу коефіцієнта відбиття  $\rho$  у видимій частині спектра  $\lambda=(380\div 760)$  нм. Моделювання довело, що коефіцієнт відбиття асфальтобетонного покриття з високою точністю (коефіцієнт достовірності апроксимації  $R^2 > 0,99$ ) можна описати простими аналітичними залежностями – логарифмічною  $\rho(\lambda)=13,033 \cdot \ln(\lambda)-70,554$  в межах (7÷16)% (старий асфальт, що найчастіше використовується в Україні, з кращим відбиттям в довгохвильовій області) та лінійною  $\rho(\lambda)=0,035 \cdot \lambda+4,07$  в межах (5,4÷6,8) % (нове асфальтове покриття з невисоким спектральним відбиттям завдяки великій місткості темного бітуму).

Для двох вищезначених типів асфальтобетонних покриттів встановлено вплив вибору світлодіодних освітлювачів з різною корельованою колірною температурою  $T_{cc}=(2200\div 8400)$  К на забезпечення яскравості дорожнього покриття в умовах атмосферних туманів різної оптичної щільності – від сильного, що відповідає метеорологічній дальності видимості МДВ=100 м, до легкого серпанку МДВ=3 км. При аналізі яскравості вважалося, що дорожнє полотно з достатнім наближенням є дифузно розсіюючим, коли у нашому випадку є справедливим співвідношення [3]:

$$L(\lambda, \beta) = \frac{\rho(\lambda)E(\lambda, \beta)}{\pi},$$

де  $E(\lambda, \beta)$  – наведена освітленість, яка прямопропорційна наведеному світловому потоку.

При розрахунках висота встановлення освітлювачів складала 10÷20 м, світловий потік визначався через повну інтегральну потужність випромінювання з урахуванням фотопічної функції, помножену на коефіцієнт світлової ефективності випромінювання, який дорівнює 683 лм/Вт, та нормувався за значенням 952 лм, спектральна залежність показника розсіяння атмосферного середовища відповідала моделі Е.Фердінандова. Результати моделювання відносної яскравості зношеного асфальтобетонного покриття для освітлювачів різної корельованої колірної температури, нормовані за максимальним значенням для освітлювача з  $T_{cc}=2200$  К, наведені на рис.3.

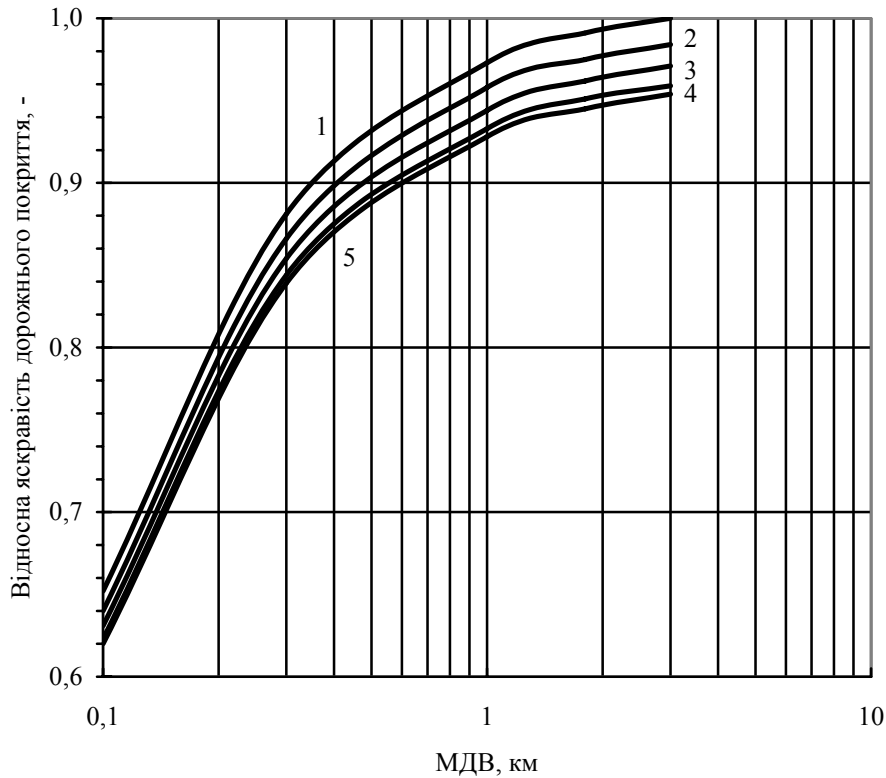


Рис.3. Залежність відносної яскравості дорожнього покриття (зношений асфальт) від метеорологічної дальності видимості при використанні освітлювачів з різною  $T_{cc}$ : 1 – 2200 К; 2 – 3054 К; 3 – 4119 К; 4 – 5979 К; 5 – 8367 К.

Розрахунки довели, що при використанні освітлювачів теплого спектра випромінювання ( $T_{cc}=2200$  К) яскравість нового асфальтового дорожнього покриття в умовах  $МДВ=100$  м на 2,5 % перевищує відповідне значення від освітлювачів холодного спектра ( $T_{cc}=8400$  К). При покращенні видимості ця перевага поступово зменшується за рахунок слабкішої спектральної залежності  $\beta(\lambda)$  на фоні дуже незначного зростання коефіцієнта відбиття у довгохвильовій частині видимого діапазону і при  $МДВ=3$  км складає 1,9 %. Для зношеного асфальтового покриття ця відмінність виражена сильніше і при  $МДВ=100$  м складає приблизно 5%, повільно зменшуючись до 4,5 % при  $МДВ=3$  км. При цьому ступінь і швидкість зменшення більш уповільнені порівняно з новим асфальтом завдяки виразнішій спектральній залежності коефіцієнта відбиття.

## 5. ВИСНОВКИ

Виконані дослідження залежності відносної освітленості та яскравості розповсюджених типів асфальтобетонних покриттів доріг України довели перевагу світлодіодних освітлювачів теплого спектра випромінювання, особливо у випадку зношеного асфальту в умовах сильних туманів ( $МДВ \approx 100$  м) за рахунок характеру спектральних залежностей показника розсіяння випромінювання водними атмосферними аерозолями і коефіцієнта відбиття дорожнього полотна. Перевага використання освітлювачів теплого спектра значно посилиться для випадку оцінювання яскравості покриття на протяжних відстанях, наприклад, злітно-посадкових смугах аеропортів, що буде сприяти суттєвому покращенню безпеки польотів.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CORRELATED COLOR TEMPERATURE OF LED ILLUMINATORS AS A FACTOR OF SAFETY LIGHTING OF HIGHWAYS FOR DIFFICULT WEATHER CONDITIONS**

A investigation of the dependence of relative horizontal illumination level and brightness of the most common types of road surface in Ukraine when using LED illuminators with different spectral distribution of radiation in the presence of aerial aerosols of different optical densities (strong, moderate, weak fog and haze) is performed. Mathematical models of LED illuminators with correlated color temperature  $T_{cc} = (2200\div 8400)$  K in the visible range of the spectrum  $\lambda = (380\div 780)$  nm have been created. Their use together with the selected model of the spectral dependence of the scattering index  $\beta(\lambda)$  (Ferdinandov's model) of the atmospheric environment with the presence of aqueous aerosols, which cause a limited meteorological range of visibility  $MOR = (0.1\div 3)$  km, showed a slight (1%) advantage in creation of illumination from lamps of a warm spectrum of radiation ( $T_{cc} = 2200$  K) in comparison with cold ( $T_{cc} = 8400$  K) for cases of strong fogs with  $MOR = 100$  m. Calculations involving the analysis of mathematical modeling of the spectral distribution of the reflection coefficients for two types of road surface (new and worn asphalt) proved that when using warm spectrum illuminators the brightness of the most common in Ukraine old asphalt pavement in the conditions of  $MOR = 100$  m by 5% exceeds the corresponding value of the cold spectrum emitters. This difference gradually decreases as visibility is improved due to the weaker spectral dependence of  $\beta(\lambda)$  and at  $MV = 3$  km is 4.5%. The advantage of using warm spectrum illuminators will be significantly enhanced for the case of estimating the brightness of the coverage over long distances, for example, airfield runways, which will significantly improve flight safety.

**Keywords:** LED illuminator, correlated color temperature, illuminance, brightness, road surface, reflection coefficient, meteorological range of visibility.

1. Виикари М., Илинен А. М., Куфеоглу С., Луо В., Пуолокка М., Халонен П. Светотехнические критерии оценки дорожного освещения: обзор. *Светотехника*. 2012. № 5. С. 51-59.
2. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Ленинград: Гидрометеиздат. 1988. 216 с.
3. Гуревич М.М. Фотометрия. Теория, методы и приборы. Ленинград: Энергоатомиздат. 1983. 272 с.
4. Kruse P.W., McGlauchlin L.D., McQuistan R.B. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection. New York: John Wiley & Sons. 1962.
5. Kim I.I., McArthur B., Korevaar E.J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *Proc. of SPIE*. 2001. **4214**. P. 26-37.
6. Ferdinandov E., Dimitrov K., Dangarov A., Bakalski I. A general model of the atmospheric scattering in the wavelength interval 300-1100 nm. *Radioengineering*. 2009. **18**. P. 517-521.
7. Можаровська Т.В., Назаренко Л.А., Гур'єв М.В. Вплив матеріалу дорожнього покриття на ефективність вуличного освітлення. *Український метеорологічний журнал*. 2016. № 4. С. 38-40.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.С. Лашкарьова НАН України  
41, проспект Науки,  
03680 Київ, Україна

Отримано 07.09.2021