



УДК 535.241.42

Застосування двох моделей неідеальності джерел для збільшення точності вимірювання сили світла

В.М. Балабан, О.Д. Купко

Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна
kupko@meta.ua

Анотація

На прикладі експериментальних досліджень сили світла декількох джерел світла показано, що існують суттєві відхилення залежності освітленості від закону зворотних квадратів. Запропоновано та теоретично й експериментально досліджено дві моделі оцінок сили світла для неточкових джерел світла: модель уточнення відстаней і модель додаткових джерел.

У першій моделі до результату вимірювання відстані додається постійна поправка. Її може бути визначено з умов максимально можливої постійності оцінки величини сили світла як добуток виміряної освітленості на квадрат виміряної відстані для різних відстаней між приймачем і джерелом. У цьому випадку поправка постійна, а оцінка величини сили світла залежить від відстані між джерелом і приймачем. Або сила світла та добавка до вимірюваної відстані можуть бути визначені з умов мінімізації відхилень експериментально виміряних на різних відстанях освітленостей від розрахованих. У цьому випадку визначаються постійна сила світла та постійна поправка до відстані.

Другу модель засновано на припущенні, що відхилення від закону зворотних квадратів виникають від додаткових джерел, таких як віддзеркалення від екранів, пастки випромінювання, скла лампи та інших. У цій моделі відстані між ниткою розжарювання лампи і всіма додатковими елементами вважаються відомими, а оцінки величини сили світла додаткових джерел розраховуються з умови мінімізації відхилення між розрахованими та виміряними на різних відстанях освітленостями.

Проведено експериментальну перевірку розглянутих моделей. Показано, що кожна з них призводить до зменшення відхилення освітленості від закону зворотних квадратів для відстаней, недостатніх для того, щоб джерело світла можна було вважати точковим. Проаналізовано переваги та недоліки моделей, надано рекомендації для оцінки якості методики вимірювань сили світла. На базі цих моделей запропоновано розробити методику, яка дозволяє оцінювати якість установки для вимірювань сили світла.

Ключові слова: фотометрія; вимірювання; сила світла; джерело випромінювання; корекція вимірювань; моделі розрахунку.

Отримано: 03.01.2024

Відредаговано: 15.02.2024

Схвалено до друку: 22.02.2024

Вступ

Сила світла — це одна з основних фізичних величин, вимірювання якої необхідне в багатьох сферах науки та господарства. Сила світла дорівнює відношенню світлового потоку до тілесного кута, в межах якого проходить цей потік.

Тілесний кут — це частина простору, яка є об'єднанням усіх променів, що виходять із певної точки (наприклад, джерела випромінювання), тобто для його визначення необхідна точка. Якщо йдеться про точкове джерело, тілесний кут визначити легко, але ідеального точкового джерела не існує. Навіть звичайна вольфрамо-

ва лампа розжарювання має тіло розжарювання у вигляді спіралі, тобто тривимірного об'єкта. Існують перевідбиття між витками спіралі [1] та стінками колби. На стінках колби лампи є відблиски, положення яких сильно залежить від кута спостереження, і локальні забруднення, які теж служать джерелами або поглиначами випромінювання залежно від свого розташування щодо спостерігача. Внаслідок утворюється неоднорідне за напрямками випромінювання, яке не схоже на випромінювання точкового джерела. Якщо лампа є частиною, наприклад, прожектора, то таке джерело ще менш схоже на точкове.

Випромінення частково поглинається, частково розсіюється. Може трапитися, що джерело не єдине, це також підсилить освітленість обраної площини.

Зазвичай освітленість вимірюється люксметром. Багато люксметрів не мають зовнішньої вхідної діафрагми, але мають розсіювач і фільтр із набору кольорових стекел. Внаслідок цього складно точно визначити, між якими точками джерела та приймача слід вимірювати відстань, необхідну для визначення тілесного кута. Велика частина цих складнощів стає малозначущою при збільшенні відстані між джерелом і приймачем, тобто при наближенні до моделі точкового джерела. У тих випадках, коли джерело не є точковим, оцінка сили світла джерела як добутку освітленості на квадрат відстані до джерела призводить до різних результатів на різних відстанях. Зрозуміло, що кожне джерело світла має свою силу світла, яка не повинна залежати від того, яким чином її було визначено.

Роботу присвячено аналізу застосування двох простих моделей, які дозволяють оцінити силу світла неточкових джерел, використовуючи закон зворотних квадратів на відстанях, недостатніх для того, щоб вважати джерело точковим. Схоже завдання – перехід від вимірювань у ближньому полі до характеристик у дальньому полі, серед інших було поставлено в стратегічному плані розвитку ВІРМ на 2013–2023 роки.

Загальні принципи

Сила світла визначається через світловий потік $d\Phi_v$, що розповсюджується в елементарний конус, який містить заданий напрям із тілесним кутом $d\Omega$ [2].

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}. \quad (1)$$

Тілесний кут визначається як $\Omega = A/r^2$, де A – площа, що входить у поверхню сфери в конусі з вершиною в центрі сфери, r – радіус сфери [3]. Якщо приблизно вважати, що $d\Phi = E \cdot S$ та $d\Omega = S/L^2$, то рівняння (1) для точкового джерела можна записати у вигляді (2), який часто використовується для вимірювань сили світла реальних джерел світла.

$$I(L) = E \cdot L^2, \quad (2)$$

де E – виміряна освітленість обраної площини; L – виміряна відстань від джерела до обраної площини; S – площа, на яку спирається конус, у межах якого розповсюджується випромінення на відстані L .

При такому визначенні для неточкового джерела добуток освітленості на квадрат відстані не зобов'язаний бути постійним, тобто його не можна

вважати силою світла, але для великих відстаней, якщо джерело може вважатися точковим, сила світла за формулою (1) і результат розрахунку за формулою (2) збігаються. Для зручності надалі цей добуток називатимемо оцінкою сили світла за формулою (2). На менших відстанях виникає питання про те, що саме можна вважати відстанню від джерела до обраної площини. Якщо вимірювання освітленості проводиться люксметром, у якого конструктивно визначено та зафіксовано площину, то природно вимірювати відстань саме до неї. Якщо таку площину конструктивно не визначено, то слід визначити площину порівняння, як рекомендовано, наприклад, у [4]. При практичних вимірюваннях відстань вимірюється від якихось добре визначених точок або площин, відстань між якими за попередніми міркуваннями буде такою, що виконуватиметься закон зворотних квадратів.

Існує декілька механізмів, що призводять до відступу від закону зворотних квадратів. Розгляд їх усіх призведе до значного ускладнення моделі. Пропонується для кожної моделі виділити один простий домінуючий механізм, розглянути його вплив, проілюструвати його застосування на експерименті й оцінити перспективність запропонованого підходу. Подібні завдання розглядалися раніше, наприклад, у [5–9].

У цій роботі пропонується розглянути відступ від закону зворотних квадратів, що пов'язаний із невизначеністю відстані між неточковим джерелом і приймачем (модель ефективної відстані) та з паразитними відбиттями на екранах і діафрагмах (модель декількох джерел). Застосування цих моделей до результатів експериментальних вимірювань дозволить уточнити домінуючі причини відхилень від закону зворотних квадратів, зменшити ці відхилення або врахувати їх, а також дозволить на відносно невеликих відстанях від джерела оцінювати силу світла точніше. Зрозуміло, що якщо під час вимірювань за допомогою певної апаратури буде з'ясовано, що відхилення від закону зворотних квадратів малі, то апаратура якісна, а якщо значні – то недостатньо якісна.

Модель ефективної відстані

Ця модель полягає в тому, що реальне неточкове джерело моделюється точковим джерелом невідомої сили світла на невідомій відстані від приймача. За виміряною освітленістю в двох (або більше) положеннях приймача і за відстанню між цими положеннями визначається оцінка сили світла цього ефективного точкового джерела і відстань від них до приймача. Приймається, що знайдена оцінка сили світла є оцінкою сили світла реального неточкового джерела для цих положень приймача при вимірюванні освітленості.

Оскільки важко визначити, між якими саме частинами джерела і приймача потрібно ви-

мірювати відстань, можна припустити, що ця відстань вимірюється з постійною помилкою Δl . Якщо проведено декілька вимірювань (j), то Δl можна визначити з умови мінімальної відмінності оцінок сили світла $I(L_j)$ при різних експериментально виміряних освітленостях E_j на різних експериментально виміряних відстанях L_j . Відстані вимірюються між тими точками джерела та приймача, які зручні для вимірювань, наприклад стрічка розжарювання лампи та фіксована точка на люксометрі. Тоді рівняння (2) можна записати у вигляді

$$I(L_j) = E_j \cdot (L_j + \Delta l)^2, \quad (3)$$

де $I(L_j)$ і Δl – невідомі, тому для їх визначення необхідно зробити мінімум два вимірювання.

Поправку Δl можна визначати будь-яким зручним способом, наприклад змінюючи $I(L_j)$ та Δl , які вважаються однаковими для всіх відстаней, мінімізувати відносно відхилення розрахованих відносних відхилень освітленості від отриманих експериментально для всіх N вимірювань.

$$\left\{ \frac{\Delta E}{E} \right\}_{\min} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{E_j - \frac{I}{(L_j + \Delta l)^2}}{E_j} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

тобто знайти Δl та I – такі, що $\left\{ \frac{\Delta E}{E} \right\}$ мінімальне.

Ці значення надалі позначатимемо як значення, знайдені за формулою (4).

Інший спосіб полягає в тому, щоб мінімізувати середньоквадратичне відхилення оцінки сили світла. Знайдене значення Δl мінімізуватиме відхилення $I(L_j)$ від середнього значення I_{cp} . Ці значення надалі позначатимемо як значення, знайдені за формулою (5).

$$\{\Delta l\}_{\min} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left\{ I(L_j) - \frac{\sum_{j=1}^N I(L_j)}{N} \right\}^2}{N-1}}, \quad (5)$$

де Δl – таке, що $\{\Delta l\}$ мінімальне; $I(L_j)$ визначається за формулою (3).

Обидва способи досить легко виконуються в розповсюдженому середовищі Excel (налаштування “пошук рішення”).

Для аналізу застосування моделі корегування відстані під час досліджень обладнання у фотометричній лабораторії, на залізниці та в автомобільному транспорті [8–13] було проведено три групи вимірювань. Першу групу вимірювань проведено для ілюстрації відмінностей у конструкції приймача. Використовувалася фотометрична лава (максимальна відстань від лампи до фотометра 2,7 м, мінімальна – 0,5 м), а також світловимірювальна лампа зі спіралеподібним тілом розжарювання і колбою, конфігурація якої виключає потрапляння відбитого світла від тіла розжарювання на приймач. Перед лампою було встановлено щиток, на відстані від лампи близько 0,5 м – екран із діафрагмою. Приймачем служив один і той же фотометр на основі фотодіода і корегуючого фільтра. Проведено три серії вимірювань: у першому випадку – з вхідною діафрагмою, яка фіксувала площину фотометра, в другому випадку такої діафрагми не було, а в третьому перед фільтром був розсіювач. На рис. 1 надано результати оцінки сили світла за формулою (2), за формулою (4) (постійна величина) і за формулою (5) для фотометра з вхідною діафрагмою; на рис. 2 – для фотометра без розсіювача; на рис. 3 – для фотометра з розсіювачем. Можна розрахувати, до яких відмінностей в освітленості призводить використання для розрахунків освітленості оцінки

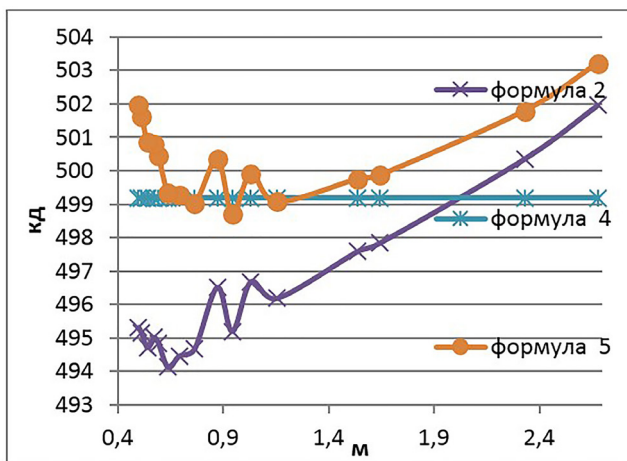


Рис. 1. Фотометр із вхідною діафрагмою. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

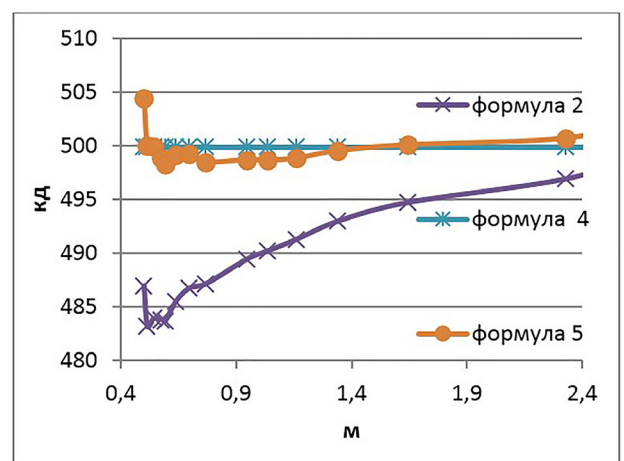


Рис. 2. Фотометр без розсіювача. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

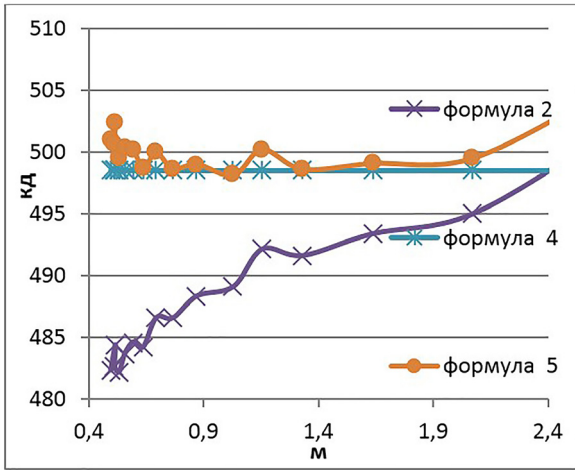


Рис. 3. Фотометр із розсіювачем. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

сили світла, що визначена за формулою (4) від експериментальних результатів вимірювання освітленості, тобто розрахована за формулою

$$\frac{\Delta E}{E_j} = \frac{E_j - \frac{I}{(L_j + \Delta l)^2}}{E_j} \cdot 100\% \quad (6)$$

Друга група вимірювань проводилася для ілюстрації впливу фокусування джерела спрямованого випромінювання. Вимірювання проводилися на фотометричній лаві в діапазоні відстаней від джерела до приймача від 3,5 до 9 м. Як приймач використовувався люксметр із корегуючим фільтром і розсіювачем, Джерелом був світлофор, який складався з лампи, однієї лінзи звичайного скла і однієї лінзи кольорового скла. Лампа розжарювання зі спіральною ниткою розжарювання завтовшки близько 0,5 мм і довжиною 10 мм розташовувалася поблизу їхнього загального фокуса. Конструкція дозволяла переміщати лампу відносно фокуса. Проведено декілька серій вимірювань при зміні положення нитки розжарювання уздовж оптичної осі на відстанях -1,5 мм, 0 мм, 4,5 мм від фокуса. На рис. 4 наведено результати розрахунків сили світла за формулами (2) і (4) для положення

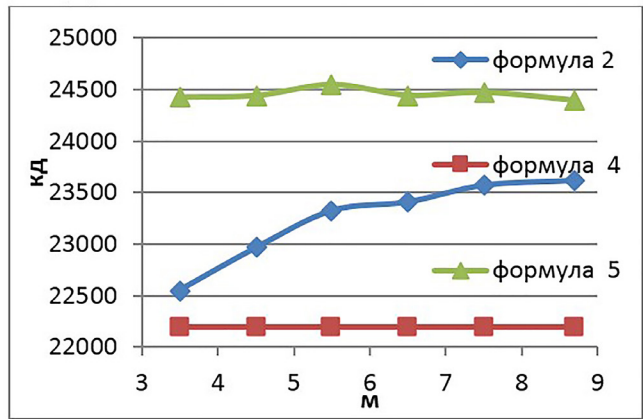


Рис. 4. Світлофор. Відстань нитки розжарювання від фокуса -1,5 мм. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

лампи на 1,5 мм далі, ніж фокусна відстань лінз, на рис. 5 – для положення лампи у фокусі й на рис. 6 – для положення лампи на 4,5 мм ближче до лінз. До яких відмінностей в освітленості $\Delta E/E$ для тих самих положень нитки розжарювання відносно фокуса призводить використання сили світла, що визначена за формулою (4) від експериментальних результатів вимірювання освітленості, може бути розраховано за формулою (6).

Третю групу вимірювань проведено для ілюстрації впливу розмірів джерела. Вимірювання проводилися на стенді в діапазоні відстаней від 2,5 до 23 м. Джерелом був телецентричний освітлювач – прилад, який використовується під час калібрування вимірювачів сили світла автомобільних фар. Він складається з лампи розжарювання, лінзи та змінних діафрагм. Джерело використовувалося або без зовнішньої діафрагми, або з діафрагмами D1 і D2. На рис. 7 наведено результати розрахунків сили світла за формулами (2), (4) і (5) для вимірювань на стенді для недіафрагмованого джерела, на рис. 8 – для діафрагмованого, на рис. 9 – для діафрагмованого з мінімальною діафрагмою. До яких відмінностей в освітленості $\Delta E/E$ для тих самих діаметрів призводить використання сили світла, що

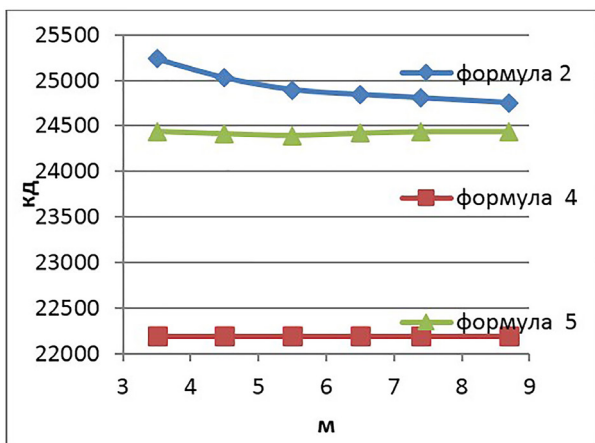


Рис. 5. Світлофор. Нитка розжарювання у фокусі. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

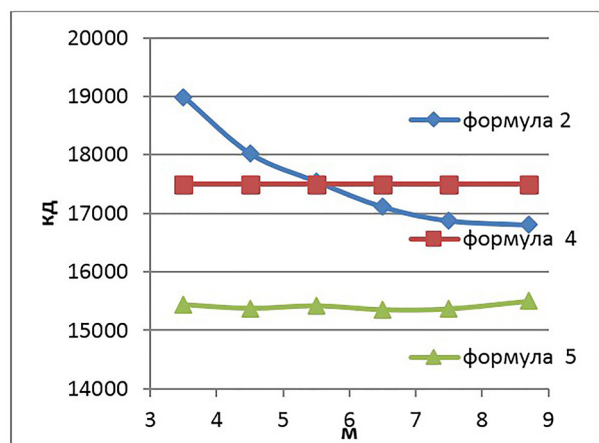


Рис. 6. Світлофор. Відстань нитки розжарювання від фокуса 4,5 мм. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

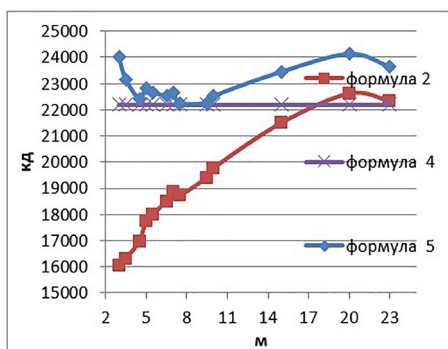


Рис. 7. Телецентричний освітлювач. Діафрагма відсутня. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

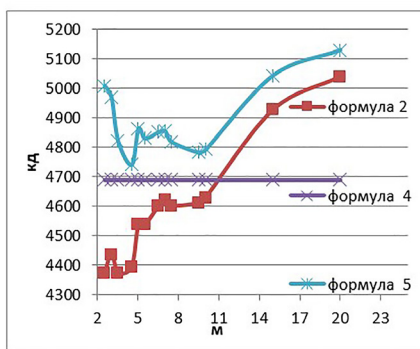


Рис. 8. Телецентричний освітлювач. Діафрагма D1. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

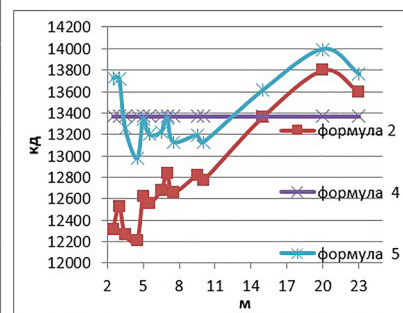


Рис. 9. Телецентричний освітлювач. Діафрагма D2. Оцінки сили світла за формулами (2), (4) і (5)

визначена за формулою (4) від експериментальних результатів вимірювання освітленості, може бути розраховано за формулою (6).

Результати усіх розглянутих вимірювань зведено у табл. 1, де наведено оцінки сили світла, відносні зміни сили світла $(I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$, значення добавок до відстані Δl для розглянутих випадків. Заголовки стовпців відповідають типам джерел та приймачів.

Відносно результатів за графіками на рис. 1–3 у рамках зроблених припущень можна сказати, що конструкцією лампи обумовлена поправка приблизно 3,3 мм, решта обумовлена фотометрами. Поправки, які обумовлені конструкцією фотометра, становлять декілька міліметрів, що співмірно з товщиною корегуючого фільтра і розсіювача. Для світлофора (графіки на рис. 4–6) поправки до відстані при значних розфокусуваннях перевершують характерні розміри світлофора. Поправка до відстані для вимірювань

телецентричного освітлювача на стенді (графіки на рис. 7–9) суттєво перевершує характерні розміри джерела, діафрагмування призводить до різкого зменшення поправки.

Застосування формули (2) призводить до найбільших відмінностей в оцінці сили світла, але в деяких випадках дозволяє прогнозувати відстань, починаючи з якої джерело може вважатися точковим.

Застосування формули (4) дозволяє отримати однозначну оцінку сили світла, яка найкраще характеризує джерело в обраному діапазоні відстаней між джерелом та приймачем. Для джерел спрямованого світла поправки до відстаней Δl можуть перевищувати характерні розміри джерела. Характер зміни відносної різниці розрахованих та виміряних освітленостей не дозволяє робити припущення щодо відстані, необхідної для того, щоб вважати джерело точковим.

Таблиця 1

Оцінки сили світла, відносні зміни сили світла $(I_{\max} - I_{\min})/I_{\text{cp}}$ і добавки до відстані Δl для розглянутих випадків (графіки на рис. 1–9)

Група вимірювань	Фотометр			Світлофор			Телецентричний освітлювач		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оцінка сили світла за формулою (2), кд	494,1-502,0	483,2-499,3	482,2-501,6	22552-23615	24751-25235	16803-18988	16029-22600	4373-5040	12211-13800
$(I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$ за формулою (2), %	1,6	3,2	3,9	4,5	1,9	11,5	29,1	13,2	11,5
dE/E середнє за формулою (5), %	0,18	0,21	0,20	2,6	2,6	3,5	2,1	1,7	1,9
Оцінка сили світла за формулою (4), кд	499,2	499,9	498,5	22193	22193	17500	22193	4690	13368
Δl за формулою (4), м	0,0024	0,0094	0,0084	-0,13	-0,31	-0,01	0,59	0,08	0,15
Оцінка сили світла за формулою (5), кд	498,7-503,2	498,3-504,4	498,1-505,1	24395-24547	24394-24438	15350-15502	22237-24144	4742-5129	12979-13993
$(I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$ за формулою (5), %	0,9	1,2	1,4	0,62	0,18	0,98	7,9	7,5	7,2
Δl за формулою (5), м	0,0033	0,0089	0,0094	0,14	-0,06	-0,34	0,67	0,17	0,14

Застосування формули (5) суттєво зменшило відмінність у силах світла у всіх випадках. Проте вигляд залежності сили світла від відстані за формулою (5) дозволяє припускати, що існують інші механізми, що обумовлюють відступ від закону зворотних квадратів, які не пов'язані з довільністю визначення вибраних точок для вимірювання відстаней. Результатом застосування моделі є нова, значно ослаблена залежність оцінок сили світла від відстані. Величина сили світла за визначенням повинна характеризувати джерело незалежно від відстані, тобто бути єдиною. Отримати цю єдину величину оцінки сили світла на діапазоні відстаней можна різними способами, наприклад: простим усереднюванням, усереднюванням із ваговою функцією або мінімізацією відмінності розрахованих і експериментально виміряних освітленостей із ваговою функцією. Легко запропонувати безліч вагових функцій, залежних від відстані, освітленості або невизначеностей їх вимірювання. Будь-який варіант дасть оцінку сили світла, що знаходиться в межах зміни, розрахованої по запропонованій моделі сили світла, тобто буде умовним. Отримані значення для поправок до відстаней згідно з формулами (4) та (5) можуть суттєво відрізнятись.

Модель декількох джерел

Модель полягає в тому, що реальне неточкове джерело, розташоване на стенді або установці, моделюється кількома точковими джерелами, які відповідають різним елементам стенда або установки з відомими відстанями між ними та невідомими силами світла кожного з них. За виміряними освітленостями в кількох (достатньої кількості) положеннях приймача і за відстанню між цими положеннями визначається оцінка сили світла кожного точкового джерела і відстань від кожного з них до приймача. Приймається, що знайдена оцінка сили світла є силою світла реального неточкового джерела в напрямку, що визначається положеннями приймача при вимірюванні освітленостей. Безпосередній облік усіх можливих джерел перевипромінювання: екранів, щитків і пастки є очевидним підходом у спробі обґрунтувати залежність оцінки сили світла від відстані вимірювання, тобто обґрунтувати відхилення від закону обернених квадратів. Рекомендації відносно конструкції фотометричної лави досить поширені, викладені, наприклад, у [4]. Найбільш вірогідною причиною відхилення від закону зворотних квадратів може виявитись розсіяння і відбиття на екранах, випромінювання від світлової пастки, яку має бути встановлено за лампою, і випромінювання, розсіяне на поверхні колби лампи. Якщо це так, то можна досить просто записати вираз для освітленості фотометра $E(L_j)$ на різних відстанях

L_j від лампи, використовуючи сили світла джерел.

$$E(L_j) = \sum_i \frac{I_i}{(L_j - l_i)^2}, \quad (7)$$

де I_j – сили світла джерел, зокрема I_0 – сила світла лампи; L_j – відстані від нитки розжарювання лампи до фотометра; l_i – відстані від нитки розжарювання лампи до скла лампи, до пастки і екранів.

Якщо вважати l_i і L_j відомими, то, маючи достатнє число вимірювань $E(L_j)$ на різних відстанях, можна знайти сили світла I_i , тобто вирішити обернену задачу. У цьому припущенні всі I_i постійні, хоча зрозуміло, що для різних положень фотометра вони можуть трохи змінюватись. Враховуючи, що всі вимірювання проводяться з якоюсь точністю, то аналітичне рішення є не таким привабливим, як рішення, отримане за допомогою якогось критерію, зручного для значного числа вимірювань. Критерієм може бути багато. Найбільш простий критерій – мінімізація середнього модуля різниці експериментально виміряною і розрахованою за формулою (6) освітленістю. Мінімізувалася величина Δ , яку розраховано за формулою (8).

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |E(L_j) - E(L_j)_{\text{експ}}|, \quad (8)$$

де $E(L_j)$ – освітленості на відстанях L_j , які розраховані за формулою (6); $E(L_j)_{\text{експ}}$ – експериментально виміряні освітленості на тих самих відстанях; N – кількість вимірювань.

Підсумовування проводиться по всіх j вимірюваннях. Варіюються сили світла I_i у формулі (6). Зрештою завдання зводиться до знаходження мінімуму функції Δ від багатьох змінних, мінімальне число змінних дорівнює числу джерел, що враховуються (якщо відстані вважати відомими). Запропоноване рішення краще від точного рішення системи лінійних рівнянь, тому що дозволяє використовувати кількість вимірювань, більшу ніж кількість невідомих, а також за достатньою кількістю вимірювань знаходити й відстані. Зрозуміло, що така функція може мати декілька мінімумів, тому для знаходження рішень, що мають сенс, необхідна додаткова інформація. Таку інформацію може бути отримано внаслідок детального дослідження установки, з допомогою якої проводились вимірювання. Для ілюстрації запропонованого підходу під час дослідження державного первинного еталона сили світла після його удосконалення [14] були проведені вимірювання на установці, яка входить до складу еталона та подібна до установки, рекомендованої в [3]. Схему установки надано на рис. 10.

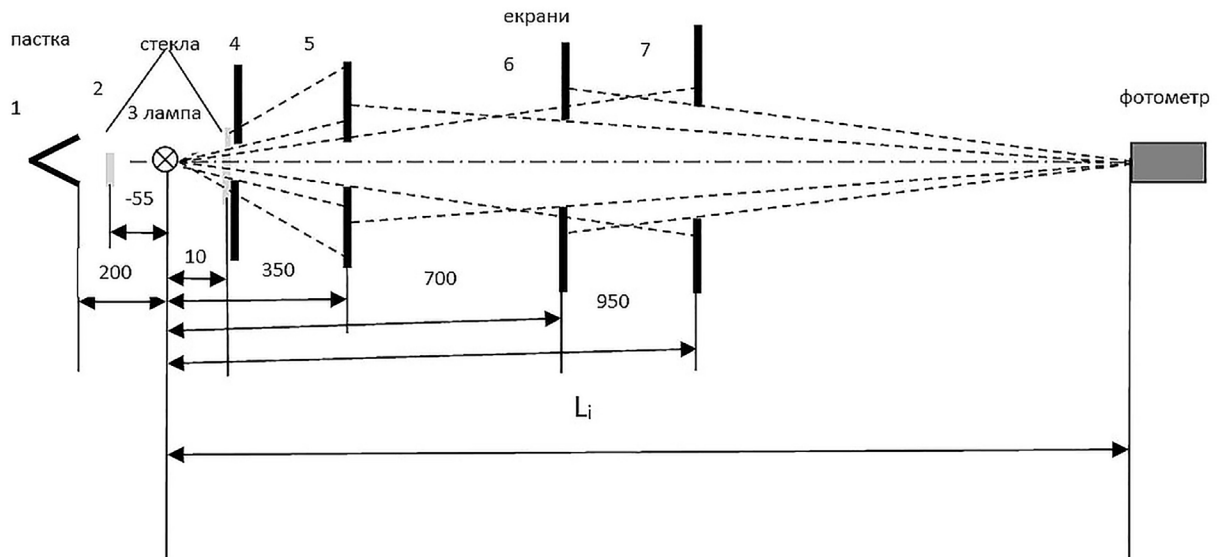


Рис. 10. Схема вимірювань. Відстані вказані в міліметрах

На схемі позначені екрани з діафрагмами, світлова пастка і додатково позначено положення скла колби лампи, де може відбуватися розсіяння випромінювання. Вважалося, що щиток лампи знаходиться впритул до колби, хоча реально він розташований на відстані 10 мм від колби. Враховуючи рекомендації відносно мінімальної відстані між фотометром та екраном [4], було проведено вимірювання на відстанях від 1,05 до 1,8 м. Юстування фотометра за напрямком на кожній відстані не проводилось. Фотометр було побудовано на основі кремнієвого фотодіоду з 4-компонентним фільтром $V(\lambda)$. Фотометр мав вхідну діафрагму, до неї проводилося вимірювання відстаней до нитки розжарювання лампи. Використовувалися світловимірювальна лампа СИС 107-500, блок живлення WY12010, реєстрація проводилася пікоамперметром Keithley 6487. Загальна картина для незначних змін у відстанях однакова, тому тут розглянуто тільки один, позначений на рисунку набір відстаней від лампи до екранів і пастки. Вимірювалась освітленість

на різних відстанях. Середня сила світла, що визначена за формулою (2) зі встановленою діафрагмою, становила 479,2 кд. Для ілюстрації застосовності моделі було прибрано діафрагму (позиція 5 на рис. 10), тобто функції діафрагми стало виконувати кріплення діафрагми. Час, потрібний для цього, – менш ніж одна хвилина. Режим роботи лампи не змінювався. На рис. 11 наведено зображення цієї діафрагми й екрана.

Були проведені вимірювання освітленості на тих самих відстанях. Оцінка середньої сили світла за формулою (2) без встановленої діафрагми становила 483,3 кд, тобто стала більше приблизно на 0,8%. Графіки оцінок сили світла, що визначені за формулою (2) залежно від відстані для вимірювань із діафрагмою і без діафрагми, надано на рис. 12. Оцінка сили світла на різних відстанях за наявності діафрагми змінювалася на 0,17%, а за відсутності діафрагми – на 1,0%, тобто діафрагма виконує важливу роль.

Розрахунки мінімального значення Δ за формулою (6) проводились за допомогою стан-

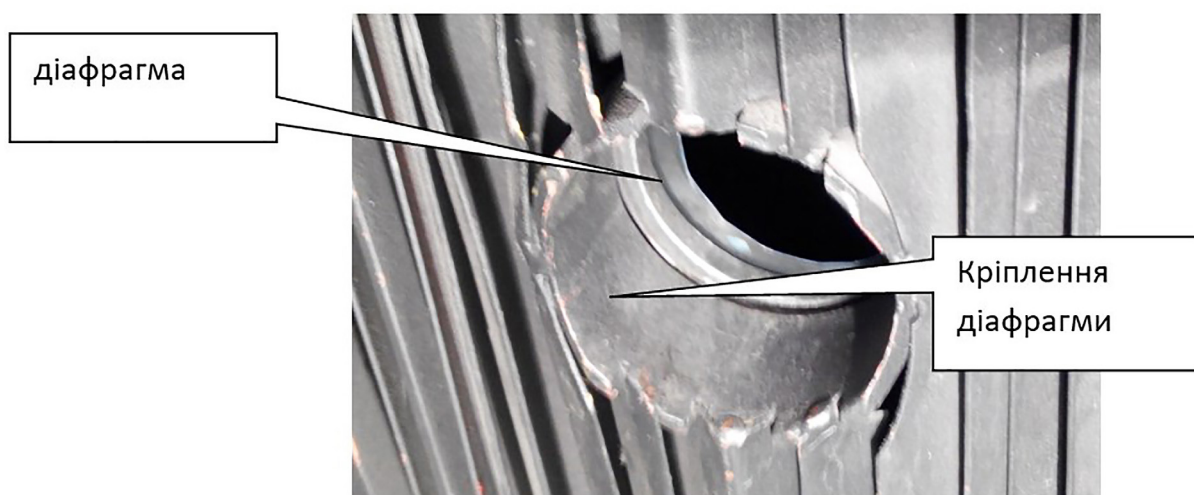


Рис. 11. Конструкція екрана (позиція 5 на рис. 10)

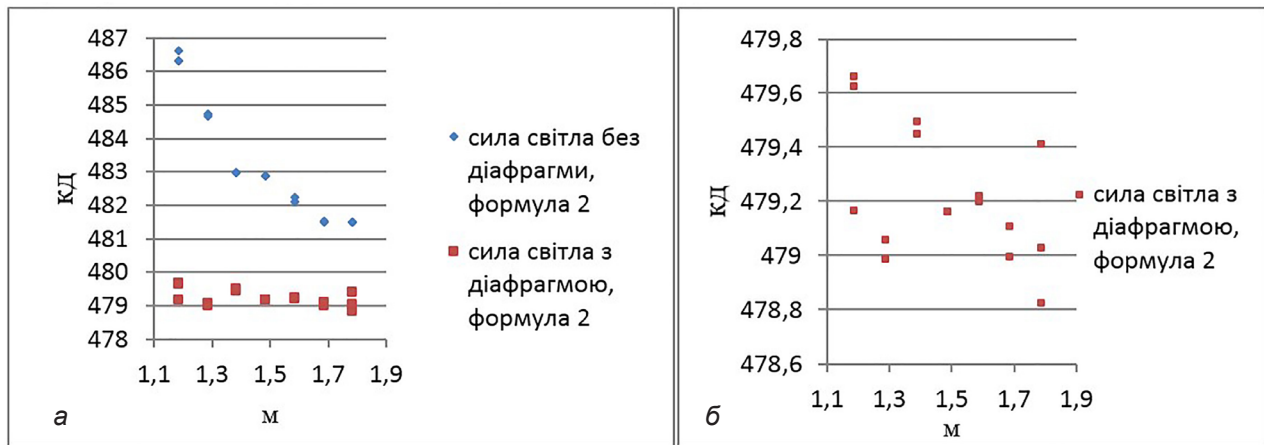


Рис. 12: а – залежності оцінки сили світла від відстані з діафрагмою на екрані (позиція 5 на рис. 10) та без неї; б – залежність оцінки сили світла від відстані з діафрагмою на тому ж екрані (змінено масштаб осі сили світла)

дартної функції “пошук рішення” в середовищі Excel. Вони показали, що, вибираючи сили світла I_i , достатньо легко отримати хорошу відповідність освітленості за розрахунком та експериментально вимірюною освітленістю, проте зробити це можна багатьма способами. Ітераційний процес приводив до різних результатів залежно від початкових умов розрахунку, від попередньо заданих сил світла I_i . Тому слід накласти обмеження на межі змін I_i , а також дослідити можливість використання такого спрощеного методу рішення оберненої задачі.

У вказаному випадку було накладено такі умови. Сума сил світла всіх джерел (починаючи від пастки й до третього екрана) і сума сил світла від нитки розжарювання лампи і стекло колби повинні відрізнятися від середньої сили світла, визначеної за формулою (2), не більше ніж на 2,5%. Припускалося, що сила світла кожного джерела має бути пропорційна силі світла нитки розжарювання лампи. Оцінку для найбільшої сили світла екранів було зроблено, виходячи з їхніх геометричних розмірів за припущення, що краї діафрагми екранів є ідеальними ламбертівськими відбивачами. Завищену оцінку для найбільшої сили світла пастки було зроблено за геометричними розмірами пастки за припущення, що фарба має коефіцієнт поглинання 0,8. Силу світла переднього та заднього

скла лампи було оцінено експериментально – нитки розжарювання перекривалися непрозорим екраном і вимірювалася освітленість з екраном і без нього на всіх відстанях. Внесок стекло колби лампи вважався однаковим. Оскільки були виміряні розподіли освітленості з діафрагмою і без неї, було оцінено силу світла екрана без діафрагми (позиція 5 на рис. 10). Вона змінювалася залежно від відстані, максимальна величина становила 4,8 кД. Відношення освітленостей, тобто частка в загальній силі світла двох стекло лампи, змінювалось залежно від відстані до максимальної величини 0,0075, тобто менше ніж на відсоток. Для обмежень на силу світла стекло колби лампи й екрана без діафрагми використовувалися найбільші величини.

Для того, щоб відокремити вплив похибок вимірювання та непостійність сили світла додаткових джерел (поз. 1, 2, 4, 5, 6) на результати розрахунків, було проведено дослідження методу рішення оберненої задачі методом математичного моделювання. Для тих самих відстаней між стрічкою розжарювання та іншими джерелами світла (діафрагмами, стеклами та пасткою) для цих джерел було призначено сили світла, менші ніж оцінки їхніх значень. За цими даними було розраховано значення освітленостей на відстанях від 1,1 до 2 м. Для кожної відстані було розраховано

Таблиця 2

Відстані елементів оптичної схеми від стрічки розжарювання лампи, їхні задані сили світла та діапазон змін цих сил світла під час математичного моделювання

Елемент	1	2	3	4	5	6	7
Відстань, м	-0,2	-0,055	0	0,035	0,35	0,7	0,95
Задані сили світла, кД	0,01	1	480	1	5	0,01	0,01
Діапазон сили світла, кД	0-0,03	0-3	478,2-502,7	0-3	0-15	0-0,03	0-0,03
Відхилення, лк	0,098	0,86	2,5	0,79	0,65	0,15	0,14

силу світла за формулою (2). Значення сили світла елементів 1–7 та діапазони, в яких вони могли змінюватися, наведено в табл. 2. Останній рядок – відхилення, отримане за результатами розрахунків, визначення цієї величини буде надано пізніше.

Потім отримані дані було використано таким самим чином, як і експериментальні значення для розрахунків сили світла кожного з джерел. На першому етапі було досліджено вплив початкових умов. Було визначено, якщо початкові значення сил світла елементів відрізняються від тих, що були використані для розрахунків освітлення, навіть на мінімальну величину, менш ніж на 0,01%, то результати рішення для окремих елементів вже будуть відрізнятися від наперед заданих. Але знайдені сили світла для тих елементів, що найбільше впливають на освітленості, в цьому випадку – елементи 3 (стрічка розжарювання) та 5 (кріплення діафрагми), досить близькі до наперед

заданих. Тому другим етапом було проведено статистичне дослідження впливу початкових умов. Для початкових умов використовувались випадкові сили світла елементів 1–7 у межах діапазонів, які надані в табл. 2. Для кожного набору за допомогою стандартної процедури Excel “пошук рішення” знаходилося рішення – набір сил світла елементів 1–7. Було проведено 50 таких процедур. Аналіз рішень показав, що в жодному рішенні не було знайдено в точності тих сил світла, що були використані для визначення освітлення при моделюванні. Кожного разу рішення для якогось з елементів співпадало з межею діапазону. Але для елементів 3 та 5, тобто тих, що найбільше впливають на освітленості, рішення найчастіше давали досить близькі результати. Враховуючи, що сила світла лампи складається з сили світла її стрічки розжарювання та двох стекол, було проаналізовано і цю величину.

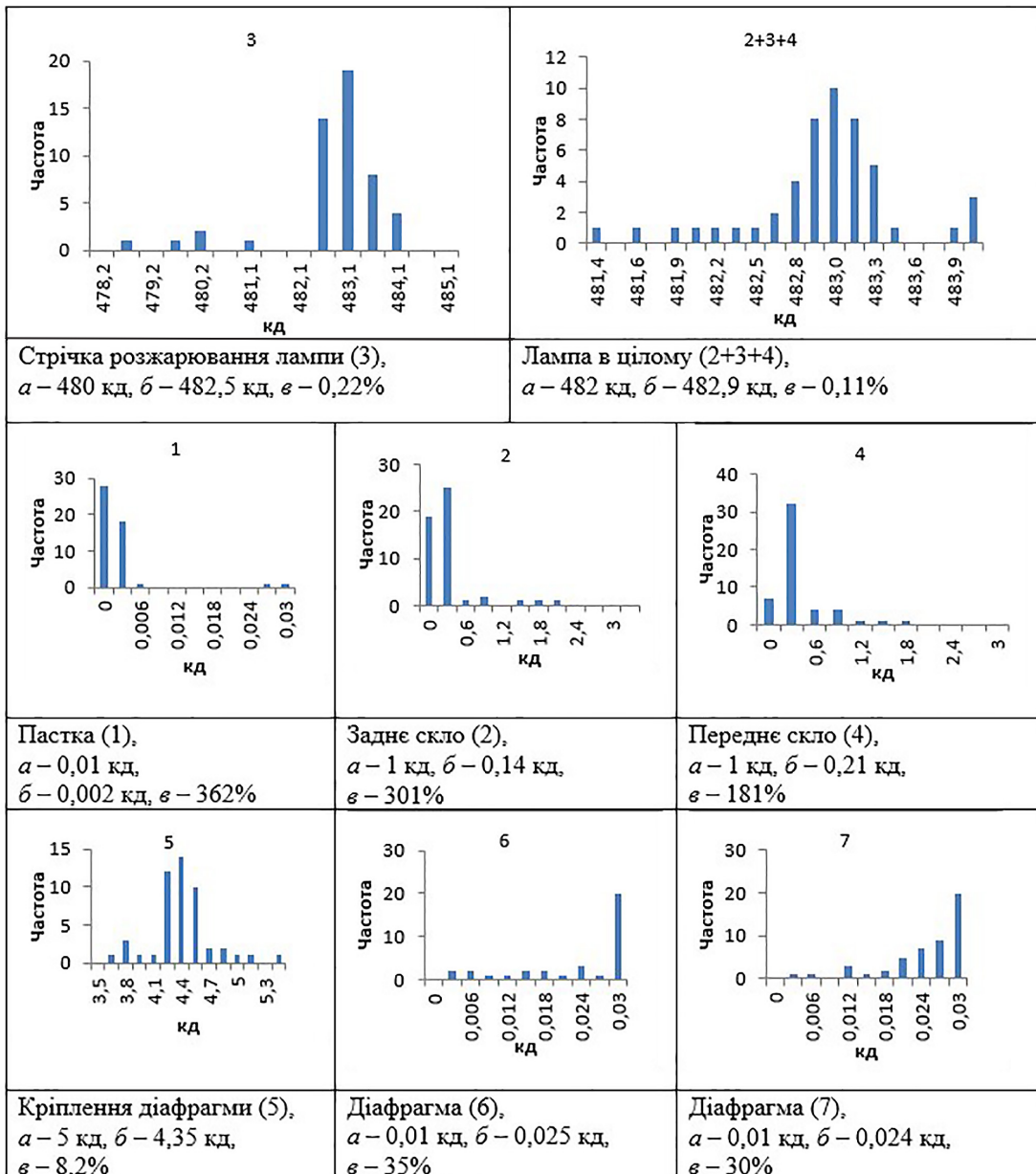


Рис. 13. Гістограми розподілу рішень для всіх елементів, що зазначені в табл. 2

На рис. 13 надано гістограми розподілу рішень для всіх елементів (позиції 1–7 на рис. 10), тобто кількість рішень у вузьких інтервалах сили світла. Над кожною гістограмою надано найменування елемента згідно зі схемою на рис. 10, нижче a – сила світла, яку було використано для визначення освітленості при моделюванні, тобто справжнє значення, b – середнє значення, що отримано з розрахунків за результатами рішень, а також c – характеристика щільності отриманих результатів рішень для цього елемента, тобто стандартне відхилення, нормоване на середнє значення у відсотках. Видно, що для кожного елемента щільність тим менша, чим більший його вплив на освітленість. Стандартне відхилення для лампи в цілому менше, ніж для стрічки розжарювання.

Застосування моделі для лампи в цілому порівняно зі звичайним підходом (формула (2)) привело до позитивних наслідків. Величина Δ (формула (7)) у середньому становила 0,012 лк. Зважаючи, що розраховані величини освітленості змінювались від 340 до 120 лк, можна стверджувати, що за умови відсутності невизначеностей, пов'язаних з експериментальним обладнанням, рішення задовільне. Такий метод може бути використано і для експериментальних даних. Відхилення – різниця між освітленостями, що були отримані при моделюванні, тобто справжніми значеннями, та середніми значеннями, отриманими за розрахунками, надано в останньому рядку табл. 2. Чим більший вплив кожного елемента на розподіл освітленості, тим до кращих результатів приводить застосування моделі.

Результати експериментальних вимірювань освітленостей (рис. 12) було оброблено таким самим чином, як і попередні теоретично отримані результати. Середнє відхилення розрахованих (формула (7)) та експериментально виміряних освітленостей Δ у випадку з встановленою діафрагмою становило 0,08 лк, а без діафрагми – 0,8 лк. Порівнюючи з середнім відхиленням під час математичного моделювання, можна сказати, що частина невизначеностей, обумовлена методом розрахунку, значно менша, ніж та, що обумовлена

похибками вимірювань. Результати розрахунків надано в табл. 3.

Видно, що для звичайного розташування елементів, тобто встановленої діафрагми 5, результати вимірювання сили світла за звичайним методом (середнє значення за формулою (2)) та за запропонованим методом практично співпадають. У випадку недосконалої оптичної схеми, тобто якщо замість діафрагми 5 було кріплення діафрагми, результат розрахунку сили світла за запропонованим методом ближчий до середнього результату, отриманого на досконалій оптичній схемі, ніж за звичайним методом. Тобто метод спроможний частково (приблизно на 0,3%) корегувати викривлення, отримане внаслідок недосконалості оптичної схеми. Метод надає одну силу світла для лампи, на відміну від набору сил світла, що залежать від відстані в разі використання звичайного методу. Для рішення оберненої задачі було використано розповсюджений неспеціалізований засіб – середовище Excel, який не є досконалим для вирішення цієї задачі. Можливо, що розробка спеціалізованого методу рішення приведе до кращих результатів.

Аналіз застосовності

Основна формула для визначення сили світла припускає віддаленість джерела від приймача. У цій роботі розглянуто дві моделі, які дозволяють уточнювати значення сили світла джерела за даними експериментальних вимірювань в умовах недостатньо великих відстаней між джерелом та приймачем. Запропоновані моделі були застосовані до результатів експериментальних вимірювань двох типів. Перший тип – це світловимірювальні лампи, що розташовані на відносно невеликих оптичних лавах. У таких випадках використовуються різноманітні екрани і світлові пастки. Основна мета таких вимірювань – отримати для світловимірювальної лампи таку оцінку сили світла, яка мало залежатиме від особливості конструкції оптичної лави, зокрема довжини. У такому разі лампа придатна для розповсюдження світлових одиниць і різноманітних звірень. Для такого

Таблиця 3

Оцінки сили світла за результатами розрахунків

	Сила світла лампи в цілому (в моделі декількох джерел), кд	Стандартне відхилення, %	Оцінка сили світла за формулою (2), кд	Середня сила світла за формулою (2) (оцінка), кд
Вимірювання з діафрагмою 5	479,1	0,03 %	від 478,8 до 479,7	479,2
Вимірювання без діафрагми 5	481,8	0,27 %	від 481,5 до 486,6	483,3

завдання можуть бути застосовні моделі декількох джерел і модель ефективної відстані. Другий тип – це вимірювання сили світла вузько-спрямованих джерел, які зазвичай використовуються на значно більших відстанях. У цьому випадку основною метою є оцінка сили світла, яка характеризуватиме вимірювання, проведене на таких відстанях, коли джерело може вважатися точковим. Для цього завдання застосовна тільки модель ефективної відстані.

Модель декількох джерел без додаткових обмежень дає результати, залежні від вибору початкових умов для розрахунків. Враховуючи те, що при пересуванні приймача змінюються кути збору випромінювання, зрозуміло, що основне припущення моделі – те, що для кожного джерела існує своя постійна сила світла, є не зовсім вірним. Пошук додаткових обмежень достатньо трудомісткий і схожий на детальне дослідження установки. Зрозуміло, що можливий подальший розвиток моделі – наприклад, облік сил світла джерел, що змінюються, і уточнення їхніх граничних значень, а також, у першу чергу, – розроблення іншого методу рішення оберненої задачі. Сила світла лампи, використовувана в цій моделі, відповідає формулі (1), тобто основному визначенню.

Модель ефективної відстані за формулою (5) у всіх випадках зменшує відмінність в оцінках сили світла в усьому діапазоні відстаней, що використовуються. Модель ефективної відстані за формулою (4) надає однозначну оцінку сили світла, таку, що мінімізує експериментально виміряні та розраховані за цією силою світла освітленості. Модель не чутлива до вибору початкової величини для введення поправки до відстані. Модель не вимагає детального попереднього дослідження установки і джерела. Проте вимірювання зі спрямованими джерелами випромінювання свідчать

про те, що поправка до відстані може бути більша, ніж характерні розміри джерела і приймача, тобто причина відхилення від закону зворотних квадратів не пов'язана з неточним визначенням обраних точок джерела і приймача для вимірювань відстаней. Імовірно, що для випадків джерел спрямованого випромінювання на оптичній осі утворюються дійсні або уявні зображення лампи розжарювання. У такому разі можна було б застосувати модель декількох джерел, проте пошук обмежень для цього випадку не ясний. У будь-якому випадку можна стверджувати, що ступінь постійності оцінки сили світла будь-якого джерела за формулою (2) є показником якості проведених вимірювань.

Наведені результати вимірювань та розрахунків для фотометричної лави зі світловимірювальною лампою та фотометром, для світлофора та для телескопічного освітлювача є типовими. Тобто для найбільш поширених вимірювань, які забезпечують безпеку на залізницях та на автомобільних шляхах, відмінності під час вимірювань сили світла є значними. Для лабораторних вимірювань на фотометричній лаві відмінності значно менші, але вимоги до таких вимірювань більш суворі. Враховуючи, що вже є загальноприйнятим характеризувати якість приймачів стандартизованими методами [15], слід обговорити можливість розробки методики характеризування якості установок, методів вимірювання та розрахунків сили світла, що використовуються. Вона могла б стати національним документом, який надає критерій придатності обладнання (фотометричної лави або стенда), призначеного для вимірювань сили світла. Постійність оцінки сили світла на різних відстанях за формулою (2) може бути однією з таких характеристик, а запропоновані моделі – базою для створення методик використання.

Application of two models of non-ideality of sources to increase the accuracy of luminous intensity measurements

V. Balaban, O. Kupko

National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
kupko@meta.ua

Abstract

On the example of experimental studies of the luminous intensity of several light sources, it is shown that there are significant deviations of the luminous intensity dependence from the inverse-square law. Two models for estimating the

luminous intensity for non-point light sources are proposed, theoretically studied and experimentally verified: the model of distance refinement and the model of additional sources.

In the first model, a constant correction is added to the distance measurement result. It can be determined provided that there is a maximum possible constancy of the estimate of the luminous intensity as the product of the measured illuminance and the square of the measured distance for different distances between the receiver and the source. In this case, the correction is constant, and the estimate of the luminous intensity depends on the distance between the source and the receiver. Alternatively, the luminous intensity and the correction to the measured distance can be determined by minimising the deviations of experimentally measured illuminances at different distances from the calculated ones. In this case, a constant luminous intensity and a constant distance correction are determined.

The second model is based on the assumption that deviations from the inverse-square law arise because of additional sources, such as reflections from screens, radiation traps, lamp glass, and others. In this model, the distances between the lamp filament and all additional elements are assumed to be known, and the luminous intensity estimates of additional sources are calculated provided that the deviation between the calculated and measured illuminances at different distances is minimised.

The considered models have been experimentally verified. The advantages and disadvantages of the models have been analysed, and recommendations for assessing the quality of the procedure for luminous intensity measurements have been given. Based on these models, it is proposed to develop a procedure that would allow assessing the quality of the installation for luminous intensity measurements.

Keywords: photometry; measurement; luminous intensity; radiation source; measurement correction; calculation models.

Список літератури

1. Купко О.Д., Терещенко В.В. Аналіз похибок світловимірювальних ламп СИС. *Український метрологічний журнал*. 2015. № 3. С. 25–30.
2. BS ISO 80000-7:2019. Quantities and units. Light and radiation. 46 p.
3. ДСТУ ISO 80000-3:2016. Величини та одиниці. Частина 3. Простір та час (ISO 80000-3:2006, IDT).
4. Ohno Y., Blattner P., Gardner J., Goodman T. et al. Photometry using $V(\lambda)$ -corrected Detectors as Reference and Transfer Standards. CIE, Vienna, 2014. 34 p.
5. Ohno Y., Jacobs V., Blattner P., Bergen T. et al. Analyses of errors associated with photometric distance in goniophotometry. *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 2015.
6. Sanchez Jr., Siriaco M. Compared analysis of near-field and far-field photometry on a LED projector. *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 2015.
7. Velázquez J.L., Pons A., Ferrero A. et al. Model for illuminance produced by LEDs as a function of distance. *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 2015.
8. Купко А.Д. Совершенствование методики передачи световых единиц. *Український метрологічний журнал*. 2001. № 1. С. 45–47.
9. Kupko A., Polyarus A., Tereshchenko V. The method of car headlights luminous intensity measuring for non-point sources of light. *Автомобільний транспорт*. 2015. № 37. С. 108–110.
10. Полярус О.В., Купко О.Д., Черняк Ю.А. Похибки вимірювання сили світла автомобільних фар та дорожніх світлофорів. *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини та обладнання*. 2010. № 57. С. 222–231. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmpm_2010_57_39
11. Купко А.Д., Чуб С.Г. Светотехнические измерения на железнодорожном транспорте. *Український метрологічний журнал*. 2010. № 1. С. 31–36.
12. Купко О.Д., Терещенко В.В. Аналіз похибок вимірювання сили світла автомобільних фар. *Метрологія та прилади*. 2014. № 4. С. 32–37.
13. Купко А.Д., Терещенко В.В. Анализ проведения измерений приборов для поверки измерителей силы света транспортных средств. *Український метрологічний журнал*. 2015. № 2. С. 32–39.
14. Балабан В.М., Баранов В.М., Бондаренко Л.І., Неєжмаков П.І. та ін. Удосконалення державного первинного еталона одиниці сили світла. *Український метрологічний журнал*. 2016. № 1. С. 37–42.
15. CIE 069-1987. Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters: Performance, Characteristics and Specifications.

References

1. Kupko O., Tereshchenko V. Analiz pohybok svitlovymiryuvalnyh lamp SYS [Analysis of Errors of CIC Light-Measuring Lamps]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2015, no. 3, pp. 25–30 (in Ukrainian).

2. BS ISO 80000-7:2019. Quantities and units. Light and radiation. 46 p.
3. DSTU ISO 80000-3:2016. Quantities and Units. Part 3. Space and Time (ISO 80000-3:2006, IDT) (in Ukrainian).
4. Ohno Y., Blattner P., Gardner J., Goodman T. et al. Photometry using $V(\lambda)$ -corrected Detectors as Reference and Transfer Standards. CIE, Vienna, 2014. 34 p.
5. Ohno Y., Jacobs V., Blattner P., Bergen T. et al. Analyses of errors associated with photometric distance in goniophotometry. *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 2015.
6. Sanchez Jr., Siriaco M. Compared analysis of near-field and far-field photometry on a LED projector. *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 2015.
7. Velázquez J.L., Pons A., Ferrero A. et al. Model for illuminance produced by LEDs as a function of distance. *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 2015.
8. Kupko A. Sovershenstvovanie metodiki peredachi svetoviyh edinit [Improvement of the Procedure for Transferring the Light Units]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2001, no. 1, pp. 45–47.
9. Kupko A., Polyarus A., Tereshchenko V. The method of car headlights luminous intensity measuring for non-point sources of light. *Automobile Transport*, 2015, no. 37, pp. 108–110.
10. Polyarus O., Kupko O., Chernyak Yu. Pohybky vymiryuvannya syly svitla avtomobilnyh far ta dorozhnyh svitloforiv [Errors in Measuring the Luminous Intensity of Car Headlights and Road Traffic Lights]. *Construction, materials science, mechanical engineering. Series “Lifting and transport, construction and road machines and equipment”*, 2010, no. 57, pp. 222–231 (in Ukrainian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmpm_2010_57_39
11. Kupko A., Chub S. Svetotekhnicheskie izmereniya na zheleznodorozhnom transporte [Light Measurements on Railway Transport]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2010, no. 1, pp. 31–36.
12. Kupko O., Tereshchenko V. Analiz pohybok vymiryuvannya syly svitla avtomobilnyh far [Analysis of Errors in Measuring the Luminous Intensity of Car Headlights]. *Metrology and Instruments*, 2014, no. 4, pp. 32–37 (in Ukrainian).
13. Kupko A., Tereshchenko V. Analiz provedeniya izmereniy priborov dlya poverki izmeriteley sily sveta transportnyh sredstv [Analysis of carrying out of measurements of instruments for verification of light intensity of vehicles]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2015, no. 2, pp. 32–39.
14. Balaban V., Baranov V., Bondarenko L., Nevezhnikov P. et al. Udoskonalennya derzhavnogo pervynnogo etalona odynytsi syly svitla [Improvement of the national primary standard of luminous intensity]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2016, no. 1, pp. 37–42 (in Ukrainian).
15. CIE 069-1987. Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters: Performance, Characteristics and Specifications.