

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

**О. М. Ляшенко,
Ю. О. Васильєва**

СВІЛОТЕХНІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної і заочної форм навчання за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021

УДК 628.9

Ляшенко О. М. Світлотехнічні установки та системи: конспект лекцій (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / О. М. Ляшенко, Ю. О. Васильєва ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 90 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. О. М. Ляшенко;

канд. техн. наук, доц. Ю. О. Васильєва

Рецензент

А. С. Литвиненко, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла, протокол № 7 від 31.05.2016 р.

Конспект лекцій складено з метою допомогти бакалаврам спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка у підготовці до аудиторних занять і самостійної роботи, екзамену з дисципліни «Світлотехнічні установки та системи»

© О. М. Ляшенко, Ю. О. Васильєва, 2021

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021

ЗМІСТ

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ	5
ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ НОРМУВАННЯ СВІТЛОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК.....	9
2 МЕТОДИ І КРИТЕРІЇ НОРМУВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	15
3 ВИБІР НОРМОВАНОЇ ФОТОМЕТРИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	21
4 НОРМУВАННЯ ЗА ВИДИМІСТЮ.....	24
5 ВИДИМІСТЬ І РОЗРІЗНЕННЯ.....	26
6 НОРМУВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ЗА ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ.....	28
6.1 Загальні положення	28
6.2 Техніко-економічні характеристики установок за укрупненими показниками.....	29
6.3 Освітлення і продуктивність праці.....	31
7 ЕНЕРГОАУДИТ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	33
8. НОРМУВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ОСВІТЛЕННЯ	36
8.1 Показник засліпленості.....	36
9 ПОКАЗНИК ДИСКОМФОРТУ.....	42
9.1 Загальні положення розрахунку показника дискомфорту.....	42
9.2 Методика визначення UGR для стандартного спостерігача.....	48
9.3 Оцінка об'єднаного показника дискомфорту в програмі DIALux.....	52
10 РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОСВІТЛЕНОСТІ.....	55
11 ПУЛЬСАЦІЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	61
12 СВІТЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	62
12.1 Загальні положення розрахунку.....	62
12.2 Класифікація світних елементів.....	64
13 РОЗРАХУНОК ПРЯМОЇ СКЛАДОВОЇ ОСВІТЛЕНОСТІ	67
13.1 Розрахунок освітленості від точкових світних елементів із симетричним світлорозподілом.....	67
13.2 Розрахунок освітленості від несиметричних світильників.....	70
14 РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЕНОСТІ ВІД ЛІНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО СВІТЯТЬ, РОЗТАШОВАНИХ У ЛІНІЮ З РОЗРИВАМИ.....	72
15 РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ БАГАТОРАЗОВИХ ВІДБИТТІВ.....	74
16 ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗРОБКИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ.....	80
16.1 Модульне світло – конструктор.....	80
16.2 Інтеграція в архітектуру.....	80

16.3 Інтерактивність.....	81
16.4 Інтелектуальне освітлення.....	82
16.5 Екодизайн.....	83
17 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ ДЛЯ ОСВІТЛЕННЯ.....	84
17.1 Загальні характеристики світлодіодів.....	84
17.2 Біологічний вплив спектру світлодіодів на стан здоров'я людини.....	85
17.3 Обмеження по застосуванню.....	86
17.4 Яскравість світлодіодов.....	87
17.5 Якість.....	87
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

ГРЛ – газорозрядна лампа
МГЛ – металогалогенна лампа
ОУ – освітлювальна установка
МКО – Міжнародний комітет з освітлення
СУ – світлотехнічна установка
ПК – персональний комп'ютер
САПР – система автоматизованого проектування
ДС – джерела світла
СП – світлові прилади
ДБН – державні будівельні норми

ВСТУП

На сьогодні склалося декілька тенденцій у світлотехніці, аналіз яких дозволяє краще оцінити ситуацію і виробити програму дій на найближчий період. У зв'язку з цим розглянемо ці тенденції.

Виробництво в області світлотехніки в цілому характеризується поживанням, що виявилось в рості обсягів виробництва різних видів світлотехнічних виробів за останні роки. Необхідно також відзначити появу нових виробників світлотехнічної продукції, що, безумовно, є позитивним чинником. Однак підвищення обсягів виробництва, на жаль, у більшості випадків не супроводжується підвищенням якості виробів. Продукція за номенклатурою, технічним рівнем відстає від закордонних фірм і не лежить у руслі основних напрямків розвитку сучасної світлотехніки [1].

У світлотехніці одним з головних критеріїв прогресу є створення нових засобів освітлення. У цьому напрямку не можна не відзначити ряд цікавих робіт, як, зокрема, енергоекономічні й довговічні ГРЛ, безртутні натрієві лампи для світильників різного призначення, безртутні МГЛ для опромінення рослин у теплицях, лампи для експонування фотоформ у поліграфії. До числа важливих і перспективних робіт треба також ще віднести наступні: комплексні дослідження зі створення сірих ламп, що об'єднують зусилля декількох організацій; роботи з катодолюмінесценції; створення нових оптичних систем перерозподілу випромінювання, в тому числі за допомогою світловодів; використання оптичного випромінювання для знезаражування води та ін. [1,2].

Крім того, з'явилася велика кількість установок внутрішнього і зовнішнього освітлення, виконаних на найвищому рівні. Зовнішнє архітектурне освітлення за останні роки одержало широкий розвиток. У всіх великих містах світу з'явилося багато чудово виконаних ОУ, які змінили вечірній вигляд міста, що сприяло росту якісного освітлення. В ОУ внутрішнього освітлення найбільший розвиток одержали установки громадських будинків (банки, офіси, видовищні об'єкти).

Говорячи про досягнення в області техніки освітлення, не можна не відзначити два важливих фактори: застосування міжнародних норм і рекомендацій МКО і використання методів візуалізації ОУ за допомогою комп'ютерної техніки. Цей метод одержує все більше поширення і дозволяє досить точно імітувати кінцевий результат, втілити задум художника-архітектора, уникнути важких помилок.

Однієї із сучасних тенденцій у створенні енергозберігаючих ОУ є врахування природного рівня освітленості при проектуванні освітлення будинків. При цьому акцент робиться на зниженні частки штучного освітлення будинків за рахунок більшого використання природного, але не на шкоду якості створюваного освітлення.

У зв'язку з вищевикладеним комп'ютерні методи в підходах до створення освітлювальних установок є досить перспективними [3,4]. Світлотехнічні розрахунки в цілому супроводжуються значним обсягом обчислень. У більшості випадків методики розрахунку ОУ пов'язані з вибором і аналізом великого числа різноманітних параметрів, типів джерел світла, різних схем розміщення

світильників і в підсумку можливих варіантів проєктних рішень. Особливе місце в сучасному проєктуванні ОУ займає автоматизоване проєктування СУ. Використання баз даних до світлотехнічному розрахунку, реалізованих на ПК, дозволяє значно скоротити час підбору підходящого елемента (джерела світла, світлового приладу, варіанта розміщення), полегшує порівняння обраних варіантів за економічними і технічними показниками. В останні роки велике поширення одержало графічне моделювання.

Завдяки інтенсивному технологічному розвитку ПК і зниженню їхньої вартості системи автоматизованого проєктування (САПР) все більше використовуються проєктувальниками ОУ й архітекторами в їхній роботі. З розвитком програмного забезпечення САПР вже не обмежується кресленням планів. Сьогодні існує можливість відтворити зображення екстер'єру проєктованого будинку й інтер'єрів його приміщень. Як правило, програми візуалізації результатів розрахунків внутрішнього освітлення не точні. Це пов'язано з тим, що розрахований розподіл яскравостей, а також відтворення окремих матеріалів неадекватне натурі, моделювання на ПК може призвести до помилкового враження. В останні роки коректному моделюванню освітлення було приділено багато уваги. Дослідження не обмежувалися тільки фізично правильними розрахунками, вирішувалося завдання інтерпретації результатів розрахунку для забезпечення правильного відтворення. Дотепер такі системи застосовувалися лише у вузькому колі фахівців. У даний час дизайнери освітлення все частіше одержують архітектурні плани не на папері, а на дискеті. Інформація в такій формі може бути безпосередньо введена в САПР.

Тривимірне зображення світильників зберігається в базі даних САПР разом з характеристиками оздоблювальних матеріалів. Після задання характеристик матеріалів поверхонь може бути запущена програма розрахунку ОУ. Результати розрахунку відтворюються у графічній формі. На основі тих же результатів можливе відтворення тривимірного перспективного зображення приміщень, на якому відображається розподіл яскравостей по поверхнях. Зображення світильників і результати розрахунків зберігаються у вигляді графічних файлів у базі даних САПР. Це дозволяє використовувати стандартні функції САПР при оперуванні з результатами світлотехнічних розрахунків, наприклад, відтворювати розподіл освітленості або яскравості в різних перетинах приміщення. Крім того, спеціалізовані САПР можна використовувати при комплексному проєктуванні, включаючи електричну мережу.

При використанні САПР слід враховувати, що при її розробці повинні бути пред'явлені високі вимоги до світлотехнічного модуля, найбільш важливим з яких є передача даних між різними САПР.

У більшості випадків системи мають стандартні інтерфейси типу EKF-IGES, що дозволяють обмінюватися тільки двовимірною інформацією. У розрахункову програму із САПР передається тривимірна інформація. Крім розмірів і розташування світильників, вводяться характеристики матеріалів, необхідні для розрахунків візуалізації. Програма розрахунку повертає результати в САПР. Після визначення фотометричних характеристик на планах приміщення можуть бути накреслені графіки ізолюксів. Описані зв'язки найкраще

реалізуються через прямий інтерфейс. Але розрахункова програма не повинна мати обмежень за числом поверхонь, їх розташуванням і формою, приміщення, спроектовані за допомогою САПР, не повинні мати тільки прямокутну форму, необхідно враховувати тінь від меблів і устаткування. Усі ці вимоги враховуються у стандартних програмах.

Широку практику набула реконструкція вже існуючих ОУ. З цією метою використовуються спеціальні комп'ютерні програми. Останні можуть застосовуватися для освітлення цілого крила будинку або поверху ДС однієї кольоровості, але з різними світловими потоками. У такий спосіб досягається економія електроенергії і забезпечується якість освітлення. Додаткові переваги виникають при збереженні файлу з даними про світильники, що знайшли застосування в ОУ будинку. Як тільки на ринку з'являються нові ДС і технологія освітлення, вони можуть бути легко включені в діючу ОУ. Дані про світлорозподіл СП зберігаються в пам'яті комп'ютера. Користувачеві доступні для перегляду одночасно кілька варіантів. В одному можна переглянути значення рівнів освітленості до і після реконструкції СУ, а також остаточні результати їхньої економії електроенергії для кожного приміщення, в другому – нові рівні освітленості, розміри приміщень, ступінь їхньої зайнятості. Крім того, користувачеві доступний повний набір типових звітів. Вони містять у собі потенційну економію, типи і характеристики ДС і СП, використаних у кожному приміщенні.

Таким чином, раціональне світлотехнічне проектування є одним із сучасних шляхів економії електроенергії.

1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ НОРМУВАННЯ СВІЛОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК

Світлотехнічні установки застосовуються у всіх областях народного господарства і є найбільш розповсюдженими серед інших електроустановок.

Мета вивчення дисципліни полягає у формуванні знань з питань нормування, розрахунку і проєктування світлотехнічного та електричного носіїв освітлювальних установок.

Завданнями вивчення дисципліни є одержання уявлення про принципи дії світлотехнічних установок, що дозволяє брати участь у практичній роботі з їх обслуговування і вироблення вміння вирішувати питання нормування освітлювальних установок (вибір освітленості, оцінка якості освітлення, складання галузевих норм), проведення світлотехнічних розрахунків освітленості в полі точкових і протяжливих джерел світла, кваліфіковано формулювати завдання на розробку світлотехнічних установок, виконувати світлотехнічну й електротехнічну частини проєкту установок, оцінювати техніко-економічну ефективність рішень з урахуванням економії енергії, матеріалів і трудових ресурсів.

Курс «Світлотехнічні установки та системи» базується на знаннях, отриманих студентами із загальнотеоретичних (загальна фізика, вища математика, системи автоматизованого проєктування), загально-технічних (інженерна графіка, теоретичні основи електротехніки) і фахових (основи світлотехніки, фотометрія, джерела світла, світлові прилади) дисциплін.

Знання, отримані при вивченні курсу, можуть безпосередньо використовуватися в інженерній практиці і розвиватися в курсах навчання на вибір (Монтаж і експлуатація світлотехнічних установок, виконання дипломної роботи).

Мета і завдання нормування

Проєктування світлотехнічних установок будь-якого призначення необхідно починати з вибору параметрів установки, що визначають її продуктивність. Дані про щільність опромінення фотореагента в установці фотохімічної дії можуть бути отримані із заданої (обраної) кількості виходу продукту в одиницю часу. Щільність опромінення в установках променистого нагрівання і сушіння визначається температурою і часом нагрівання.

У ряді випадків вибір щільності опромінення або кількості опромінення в опромінювальних установках слід робити на основі розрахунку декількох варіантів, з яких вибирається за техніко-економічними показниками оптимальний. Для виконання розрахунків, що визначають оптимальний варіант, необхідно знати питомі витрати енергії в опромінювальній установці (витрати енергії на одиничну кількість продукту), для чого слід виразити продуктивність установки через фотометричні характеристики.

Найбільш складним є вибір параметрів продуктивності освітлювальних установок, а також опромінювальних установок біологічної дії (складність

процесів, кількісні характеристики рівня біологічних процесів не завжди відомі). У таких випадках вихідні дані проєктування визначаються деякими нормативними даними, встановлюваними приблизно на основі аналізу непрямих показників, наприклад для освітлювальних установок рівнями функцій зору, зоровою працездатністю, продуктивністю праці, стомленням, що виникає у процесі зорової роботи, і т.п.

Нормування освітлювальних установок можливе прямими і непрямими методами.

Пряме нормування передбачає регламентацію тих величин, що безпосередньо визначають продуктивність установки. Це, наприклад, продуктивність праці і промислових освітлювальних установок, рівень видимості або розрізнення із заданою вірогідністю вирішення зорової задачі, зорова працездатність, світлота навколишнього простору. Такий метод нормування, що визначає безпосередньо рівень виконання основної мети освітлювальної установки, є найбільш досконалим. Відсутність достатнього матеріалу, що дозволяє при проєктуванні перейти від нормованого рівня видимості, зорової працездатності або світлоти до фотометричних характеристик установки, значною мірою утрудняє застосування цього методу нормування. В окремих випадках залежність продуктивності освітлювальної установки від кількісних і якісних показників освітлення може бути визначена експериментально одним з обраних критеріїв.

Непряме нормування освітлювальних установок, засноване на регламентації фотометричних характеристик установки, а також на їхньому розподілі й співвідношенні в освітлюваному просторі й часі і за спектром, є менш удосконаленим з погляду необхідності забезпечення продуктивності установок, але більш прийнятним для практики проєктування.

Непрямий метод нормування освітлювальних установок, заснований на регламентації рівня їхньої продуктивності фотометричними характеристиками, має такі особливості:

а) будь-яка фотометрична характеристика (освітленість, яскравість освітлюваної поверхні, об'ємна щільність світлової енергії та ін.), що визначає рівень продуктивності установки, нелінійно зв'язана з нею;

б) характер нелінійної залежності продуктивності освітлювальної установки від рівня обраної фотометричної характеристики неоднаковий для різних виробничих процесів і залежить від їхньої структури, точності й напруженості зорової роботи;

в) залежність продуктивності освітлювальної установки від рівня обраної фотометричної характеристики визначається не тільки її кількісним значенням, але і структурою світлового поля в освітлюваному просторі, а також спектром і часом, що характеризує **якість освітлення**.

Якість освітлення визначається **якістю випромінювання**, використовуваного в освітлювальній установці. Якість будь-якого оптичного випромінювання характеризується розподілом його: а) у просторі; б) в часі; в) за спектром.

Від просторового розподілу випромінювання, що падає на освітлюваний рельєфний об'єкт, залежить розташування світла і тіней по його поверхні і фону. Визначає яскравісний контраст і кутовий розмір, що характеризує імовірність і швидкість виявлення об'єкта або розходження його форми при заданому рівні яскравості поля чи зору. Яскравісний контраст і кутовий розмір рельєфного об'єкта спостереження, що змінюються залежно від умов його освітлення і спостереження, прийнято називати відповідно *еквівалентним контрастом і еквівалентним кутовим розміром* об'єкта спостереження.

Спектральний розподіл відіграє вирішальну роль у формуванні контрасту об'єкта спостереження. Правильний вибір спектрального складу випромінювання може забезпечити істотне збільшення розходження об'єкта і фону не тільки за кольоровістю, але і яскравістю. Розподіл випромінювання за спектром може вплинути на колір. В освітлювальній техніці прийнято всі показники, що визначають ефективність освітлення за рахунок якості випромінювання, що надходить в око спостерігача, відносити до групи *якісних характеристик освітлення*. З наведених прикладів залежності еквівалентних значень контрасту і кутового розміру об'єктів спостереження від якості випромінювання, використовуваного для цілей освітлення, впливають такі якісні характеристики:

а) розподіл яскравості по поверхні об'єкта спостереження і прилеглого до нього ділянки фону – *мікророзподіл яскравості*;

б) розподіл яскравості в полі зору спостерігача – *макророзподіл яскравості*;

в) розподіл світлового потоку джерел світла в часі, що залежить від властивостей джерел світла, способів їхнього включення і якості живильної їхньої електричної енергії;

г) розподіл випромінювання за спектром.

Якісні характеристики (показники) освітлення визначають ефективність освітлювальної установки нарівні з кількісними критеріями. З огляду на це при нормуванні й проектуванні освітлювальних установок необхідно розглядати якісні й кількісні характеристики освітлення як дві сторони єдиної оцінки ефективності й продуктивності установок.

Оскільки рівень нормованих характеристик визначає потреби в енергії, матеріалах і устаткуванні, то необхідно при розробці правил і норм освітлення та опромінення брати до уваги, крім урахування продуктивності установки також її економіку. Отже, незалежно від призначення освітлювальних і опромінювальних установок біологічної дії кінцевою метою їх нормування повинні бути:

а) забезпечення належного рівня якісних і кількісних характеристик освітлення, що визначають продуктивність установки;

б) регламентація витрати енергії, матеріалів і обладнання, а **також** засобів на експлуатацію установки.

Взаємозв'язане вирішення цих задач нормування на основі техніко-економічного зіставлення можливих варіантів дозволить підійти до вибору норм штучного освітлення.

До методу непрямого нормування необхідно також віднести нормування питомої встановленої потужності (потужність освітлювальної установки на 1 м^2 освітлюваної площі), безпосередньо визначальний рівень виконання другої мети нормування – регламентації витрати енергії, матеріалів і устаткування для цілей освітлення.

Деякі визначення

Ефект дії випромінювання у світлотехнічній практиці часто оцінюється умовно обраними величинами (оптична щільність виявленого зображення, світлота випромінювання, яскравість фотолюмінесценції та ін.). Тому *чутливість приймача* (речовини, що реагує на поглинуте випромінювання) звичайно прийнято визначати відношенням умовно обраної величини, пропорційної ефективному значенню енергії, до енергії падаючого на приймач випромінювання:

$$g_{\lambda} = C \frac{(W_{\lambda})_{\lambda}}{F_{\lambda} t}, \quad (1.1)$$

де g_{λ} – чутливість приймача;

W_{λ} – ефективне значення енергії кожного елементарного процесу перетворення фотона;

C – коефіцієнт пропорційності.

Продуктивність *світлотехнічної установки кумулятивної дії* можна характеризувати ефективним значенням енергії процесу за час дії установки від t_1 до t_2 :

$$W_{\lambda} = \frac{S}{C} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \int_{t_2}^{t_1} l(\lambda, t) g(\lambda) d\lambda dt, \quad (1.2)$$

де $g(\lambda)$ – спектральна функція чутливості приймача;

$l(\lambda, t)$ – миттєве значення спектральної інтенсивності щільності опромінення речовини;

S – площа світлочутливої поверхні приймача.

Відмінність спектральної чутливості кожного приймача від спектральної чутливості зразкового приймача вимагає введення поправочних коефіцієнтів *актинічності*: при розрахунку установки, виборі необхідної щільності опромінення та оцінці ефективності випромінювання. Усі світлотехнічні установки, що використовують видиме випромінювання будь-якого спектрального складу, будуть мати однакову ефективність, якщо дотримано

рівність добутоків кількості освітлення $E_i t_i$ на відповідне значення активності випромінювання A_i :

$$A_1 E_1 t_1 = A_2 E_2 t_2 = \dots = A_n E_n t_n. \quad (1.3)$$

Енергетична ефективність будь-якої світлотехнічної установки визначається відношенням ефективного значення енергії установки W_e до енергії, споживаної джерелами випромінювання всієї установки W_y , або відношенням її питомого значення w_e до питомого значення енергії джерел випромінювання, що приходить на одиницю площі поверхні, яка опромінюється, w_y . З огляду на можливість оцінки будь-якого перетворення випромінювання енергетичними співвідношеннями, а також беручи до уваги, що ці співвідношення є основними в техніко-економічній оцінці світлотехнічних установок, у наступному викладі енергетичну ефективність e будемо розглядати як загальну ефективність будь-якої світлотехнічної установки:

$$e = \frac{W_e}{W_y} = \frac{\omega_e}{\omega_y}, \quad (1.4)$$

де W_e – ефективне значення енергії процесу перетворення випромінювання;

W_y – енергія, споживана джерелами випромінювання установки протягом усього часу її роботи;

ω_e і ω_y – питомі значення тих же величин на одиницю площі світлочутливої поверхні приймача.

Виразивши питоме ефективне значення енергії установки **ефективним значенням кількості опромінення** (кількістю освітлення) і питому потужність **ефективним значенням щільності опромінення** (освітленістю) приймача, що відповідає умовній рівності $e = 1$, одержимо вираз для **відносної ефективності світлотехнічної установки**:

$$e_o = \frac{F_p t}{W_y} = \frac{\varepsilon t}{\omega_y} = \frac{a_i (Et)_i}{\omega_y}; \quad (1.5)$$

$$e_o = \frac{F_p}{P_y} = \frac{\varepsilon}{P_y} = \frac{a_i E_i}{P_y}. \quad (1.6)$$

Основною фотометричною характеристикою освітлювальної установки є яскравість поверхонь освітлюваних об'єктів у напрямку до приймача (око, теле -, фото - або кінокамера). Для приймачів, що володіють кумулятивною дією (фото і кіноплівка), продуктивність освітлювальних установок визначається добутком яскравості об'єктів освітлення на час експозиції, що визначає кількість освітлення кожної ділянки кадру.

Продуктивність освітлювальних установок будь-якого типу при однакових якісних показниках освітлення визначається яскравістю освітлюваної поверхні, називаною *робочою поверхнею*, у напрямку до ока спостерігача. З цього випливає, що рівень продуктивності освітлювальної установки визначається освітленістю робочої поверхні або кількістю освітлення (для приймачів кумулятивної дії) з урахуванням коефіцієнта відбиття освітлюваної поверхні або її коефіцієнта яскравості:

$$L_P = \frac{\rho_P E_P}{\pi}, \quad (1.7)$$

$$L_{\alpha\beta} = \frac{r_{\alpha\beta} E_P}{\pi}, \quad (1.8)$$

де L_P і E_P – яскравість і освітленість робочої поверхні;

ρ_P – коефіцієнт відбиття;

$L_{\alpha\beta}$ – яскравість за напрямком поверхні, що відбиває;

$r_{\alpha\beta}$ – її коефіцієнт яскравості за напрямком (α, β) .

Вибір необхідної яскравості (освітленості) об'єкта зйомки або телепередачі в освітлювальних установках спеціалізованого призначення визначається за заданими характеристиками чутливості приймачів і необхідними значеннями оптичної щільності фотографічного зображення.

Світлота визначає рівень зорового сприйняття його яскравості.

Яскравість освітлюваного об'єкта й освітленість сітчастої оболонки в зоні його зображення, що визначають швидкість фотодисоціації молекул фотореагента.

Діаметр зіниці ока залежить від яскравості: $d = f(L)$. Це є однією з багатьох причин нелінійної залежності світлоти і яскравості $S = f(L)$.

Вказані причини нелінійного зв'язку продуктивності зорового процесу і яскравості поля зору характеризуються залежністю чутливості зорового аналізатора як від рівня яскравості центральної частини поля, так і від характеристик розподілу яскравості в навколишньому просторі в часі і за спектром, що визначають *якість освітлення*. Ця особливість освітлювальних установок загального призначення дозволяє сформулювати наступні висновки щодо принципів їхнього нормування:

а) встановлення однозначної залежності продуктивності установки від фотометричної характеристики (яскравості або освітленості робочої поверхні) ускладнено мінливістю чутливості зорового аналізатора, що змінюється у функції рівня його порушення і якісних показників освітлення;

б) оцінка ефективності освітлювальних установок загального призначення можлива лише як відносна і тільки в умовах практично однакових якісних показників освітлення.

2 МЕТОДИ І КРИТЕРІЇ НОРМУВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Через зоровий аналізатор людини надходить із зовнішнього світу найбільша кількість інформації.

Чутливість зорового аналізатора, як і чутливість будь-якого іншого приймача випромінювання, прийнято визначати характеристикою, зворотною граничному значенню випромінювання. У зв'язку з великою розмаїтістю зорових задач чутливість зорового аналізатора можна оцінювати відповідно до *функцій зору*:

- а) контрастної чутливості;
- б) гостроти розрізнення;
- в) гостроти глибинного зору;
- г) швидкості розрізнення;
- д) колірної чутливості.

Усі перелічені функції зору являють собою характеристики змін величин, зворотних зоровим порогам, залежно від яскравості поля зору, на яку адаптований зоровий аналізатор.

Існують графіки функцій зору – це залежність зорових порогів від яскравості поля зору L (кд/м²). Аналіз графіків функцій зору, виконаний доц. Матвеєвим А.Б., дозволяє зробити наступні висновки:

а) усі без винятку функції зору підвищуються зі збільшенням яскравості в зв'язку зі зменшенням відносної величини зорових порогів;

б) зростання усіх функцій зору при збільшенні яскравості адаптації характеризує підвищення відносної чутливості зорового аналізатора, а отже, збільшення продуктивності освітлювальної установки;

в) функції зору нелінійні як у результаті загальних властивостей реакцій зорового аналізатора (реакція зіниці, зміна концентрації фотореагента при зміні адаптації, зміна чутливості центральної ланки зорового аналізатора та ін.), так і специфічних властивостей окремих функцій зору;

г) у першому наближенні ріст основних функцій зору пропорційний $\lg L_{\phi}$, отже оцінку ефективності і техніко-економічних зіставлень освітлювальних установок слід робити приблизно за логарифмічною шкалою;

д) наявність специфічних властивостей зорового аналізатора призводить до різного відносного росту функцій зору при збільшенні яскравості адаптації.

Критеріями вибору нормованого значення функції зору і визначальної її яскравості робочої поверхні можуть бути:

а) гігієнічний мінімум, при якому параметри деталей зорового процесу близькі до граничних значень при максимальній вірогідності вирішення зорової задачі;

б) гігієнічний максимум, при якому практично припиняється подальший ріст ведучої функції зору;

в) заданий рівень видимості або розрізнення, обумовлений деяким запасом у порівнянні з граничними значеннями контрасту об'єкта спостереження, часу розрізнення об'єкта або його кутового розміру;

г) техніко-економічний оптимум, обумовлений мінімумом приведених витрат;

д) заданий рівень світлоти (застосовується для громадських будинків).

Вибір нормованого значення яскравості робочої поверхні необхідно робити з урахуванням їх параметрів. Основними параметрами об'єктів зорової роботи є кутовий розмір, що виявляється, або об'єкта, що розрізняється, його контраст з фоном (яскравіший або колірний) і час його виявлення або розрізнення. Для зорових робіт з обмеженим часом виявлення або розрізнення вибір яскравості за контрастною чутливістю вимагає додаткового врахування розрахункового поправочного коефіцієнта, що враховує час інерції зорового аналізатора.

Об'єктом розрізнення є окрема частина розглянутого предмета (наприклад, нитка тканини, точка, лінія, подряпина, пляма і т.п.), яку потрібно знайти або розрізнити в процесі зорової роботи.

У результаті напруженої зорової роботи виникає стомлення. Для врахування цих особливостей зорової роботи Х. Вестон [5] запропонував нормувати яскравість робочої поверхні за *зоровою працездатністю*. Зорову працездатність він визначив добутком швидкості правильного впізнання кілець Ландольта [1] із заданим напрямком розриву на імовірність правильного їхнього розрізнення.

Для приміщень громадського призначення вибір яскравості адаптації варто орієнтувати на забезпечення необхідного рівня світлоти, обумовленого в першу чергу ступенем парадності приміщення. До цих особливостей зорового аналізатора відносяться:

а) інерційність відповіді зорового аналізатора, обумовлена тимчасовими характеристиками зорового процесу;

б) залежність чутливості від рівня порушення;

в) багатокомпонентність світлосприймаючої системи ока;

г) наявність несталих (адаптаційних) процесів протягом деякого проміжку часу після зміни навантаження зорового аналізатора;

д) індуктивні зв'язки між суміжними самостійними ділянками зорового аналізатора (рецепторними полями);

е) виникнення зорового стомлення у процесі тривалої напруженої зорової роботи, що позначається на зниженні вірогідності вирішення зорових задач.

За А. В. Луїзовим [6] час зорової інерції визначається інтегралом функції загасання зорового відчуття з часом:

$$\nu = \int_0^{\infty} A(t) dt, \quad (2.1)$$

де ν – час зорової інерції;

$A(t)$ – відносна функція загасання зорового відчуття, що має максимум

$A_0 = 1$ при $t = 0$.

Продуктивність освітлювальної установки прийнято характеризувати яскравістю робочої поверхні. *Ефективний яскравісний контраст* об'єкта з фоном

$$k_9 = kt/(t+v), \quad (2.2)$$

де t – час спостереження об'єкта, s ;

v – час інерції, s ;

k – яскравісний контраст об'єкта з фоном.

Залежність між яскравістю і світлотою S – є нелінійною.

Якість освітлення визначається: розподілом випромінювання у просторі, в часі і за спектром, а також *контрастністю системи освітлення*, що визначає розподіл яскравості на поверхнях рельєфних предметів.

Наявність трьох різновидів колбочок з функціями спектральної чутливості $k(K)$, $z(K)$ і $s(K)$, що визначають кольоровий зір, не накладає особливих умов на вибір нормованої яскравості (освітленості), за винятком вимог забезпечення достатньої кольорової чутливості зорового аналізатора у всіх випадках, коли елементом зорової задачі є визначення кольору.

Аналіз основних закономірностей роботи зорового аналізатора як приймача світлових випромінювань дозволяє сформулювати вимоги до освітлювальних установок:

- 1) достатня яскравість освітлюваних об'єктів, що забезпечує необхідну вірогідність їхнього виявлення;
- 2) відсутність різкого розходження яскравостей робочої поверхні навколишнього простору;
- 3) сталість освітленості робочої поверхні в часі;
- 4) відсутність різких і глибоких падаючих тіней на робочих поверхнях і досить контрастне освітлення рельєфних об'єктів, що забезпечують зорове сприйняття їхнього обсягу і форми;
- 5) відсутність у полі зору яскравих поверхонь, що світять, які володіють великою блискістю.

Врахування спектрального складу випромінювання при нормуванні

Функції спектрального розподілу щільності випромінювання $\varphi(\lambda)$ визначають не тільки світловий потік, але і значення абсолютної A і відносної a актинічностей стосовно спектральної чутливості приймача і функції спектрального розподілу еталонного випромінювання.

Функції спектрального розподілу випромінювання необхідні для обґрунтованого вибору норми освітленості в установках з приймачами. Вони мають спектральну чутливість, що відрізняється від стандартизованої функції відносної видимості однорідних випромінювань.

Урахування спектрального складу випромінювання при нормуванні особливо важливе в тих випадках, коли спектральна чутливість приймача

змінюється у функції рівня його порушення (освітлювальні установки з низькими рівнями нормованої яскравості ($L < 10$ кд/м²), освітлювальні установки відкритих просторів, сквери і т.д.).

Відносна спектральна чутливість зорового аналізатора в умовах сутінкового зору $10 \text{ кд/м}^2 > L > 0,01 \text{ кд/м}^2$ змінюється в короткохвильову частину спектра. У сутінковому діапазоні яскравостей зсув кривої спектральної чутливості зорового аналізатора призводить до потемніння червоних кольорів з одночасним просвітленням синіх (*ефект Пуркіне*).

Для кількісного врахування цього ефекту необхідно користуватися зіставленням *еквівалентних яскравостей*. Рівність яскравостей будь-якого спектрального складу забезпечує однакову світлоту порівнюваних випромінювань при однаковому значенні яскравості поля оточення.

Цю умову можна записати для будь-яких різноспектральних випромінювань $b_i(\lambda)$ і $b_j(\lambda)$:

$$\int_{0.38}^{0.77} b_i(\lambda) \rho(\lambda) K(\lambda L_{\text{э}i}) d\lambda = \int_{0.38}^{0.77} b_j(\lambda) \rho(\lambda) K(\lambda L_{\text{э}j}) d\lambda, \quad (2.3)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття;

$\rho(\lambda)$ – спектральні характеристики відбитого випромінювання.

Рішення проводимо методом послідовних наближень, тому що функція спектральної чутливості ока $K(\lambda_e)$ залежить від величини еквівалентної яскравості L_e . На підставі вирішення цього рівняння будуємо графіки залежності відношення L_e / L у функції стандартної яскравості L для випромінювань з різними співвідношеннями часток променистого потоку (променистої яскравості) у червоній, зеленій і синій зонах спектра:

$$m_k = \Delta F_k / F; \quad m_3 = \Delta F_3 / F; \quad m_c = \Delta F_c / F, \quad (2.4)$$

де ΔF_k , ΔF_3 і ΔF_c – променисті потоки в червоній, зеленій і синій частинах спектра заданого випромінювання;

m_k , m_3 , m_c – часткові коефіцієнти;

$F = \Delta F_k + \Delta F_3 + \Delta F_c$ – повний потік випромінювання.

Границя синьої і зеленої зон прийнята рівною $\lambda_1 = 0,48 \text{ мкм}$, а зеленої і червоної $\lambda_2 = 0,56 \text{ мкм}$.

Для випромінювань з різними значеннями m_k , m_3 і m_c , що задовольняють обов'язковій умові $m_k + m_3 + m_c = 1$, були розраховані L_e / L для різних значень L . За результатами цього розрахунку були побудовані криві $L_e / L = f(L)$. Стандартна яскравість різних спектрів випромінювання, що характеризуються трьома частковими коефіцієнтами: m_k , m_3 і m_c .

Після орієнтованого визначення значення L_e за графіком необхідно зробити розрахунок L_e , користуючись загальним рівнянням, що визначає еквівалентну яскравість, знайдену за графіком (рис. 2.1):

$$L_e = 683 \int b(\lambda) K(\lambda, L_e) d\lambda, \quad (2.5)$$

де $K(\lambda, L_e)$ – функція відносної видимості в умовах адаптації на яскравість L_e .

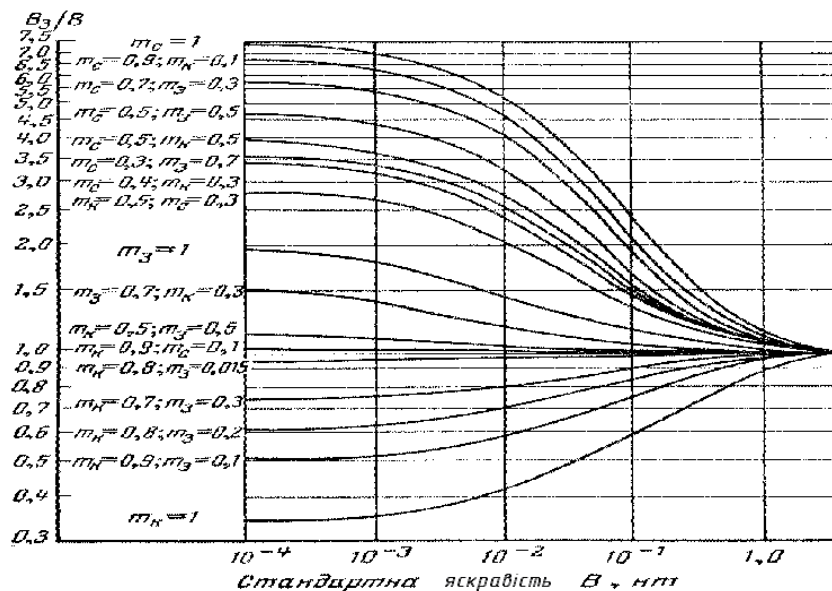


Рисунок 2.1 – Графік еквівалентної яскравості

Якщо значення L_e , отримане з (2.5), не збігається з раніше прийнятим орієнтованим значенням L_e , знайденим за графіком, операцію розрахунку треба повторити, вибравши нові значення L_e , і $K(\lambda, L_e)$.

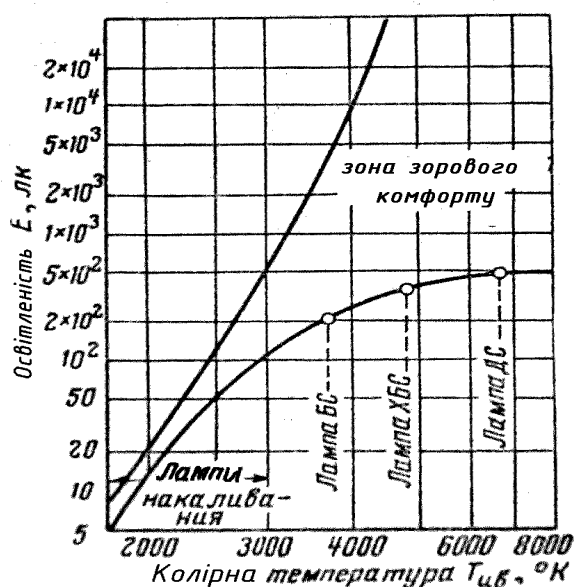


Рисунок 2.2 – Графік зорового комфорту

Виникнення відчуття дискомфорту при недостатніх значеннях освітленості пояснюється перерозподілом світлоти по окремих ділянках спектра. (Може бути усунуто збільшенням яскравості тим більшим, чим нижче колірна температура випромінювання). Як показав Матвеев А.Б. [7], для усунення ефекту Пуркіне необхідно забезпечити сталість відношення еквівалентних яскравостей різнобарвних об'єктів в умовах освітлення їхнім еталонним випромінюванням. Рівень яскравості випромінювання джерел світла при застосовувані в установці:

$$\frac{L_{e1}}{L_{e2}} = \frac{\int_{0.38}^{0.77} b_1(\lambda) \rho_i(\lambda) K(\lambda, L_{e1}) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.77} b_1(\lambda) \rho_j(\lambda) K(\lambda, L_{e1}) d\lambda} = \frac{\int_{0.38}^{0.77} b_2(\lambda) \rho_i(\lambda) K(\lambda, L_{e2}) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.77} b_2(\lambda) \rho_j(\lambda) K(\lambda, L_{e2}) d\lambda}, \quad (2.6)$$

де $b_1(\lambda)$ і L_{e1} – спектральна інтенсивність випромінювання й еквівалентна яскравість застосованого випромінювання;

$b_2(\lambda)$ і L_{e2} – ті ж для еталонного випромінювання;

$\rho_i(\lambda)$ і $\rho_j(\lambda)$ – спектральні характеристики відбиття i -го і j -го кольорових зразків;

$K(\lambda, L_{e1})$ і $K(\lambda, L_{e2})$ – функції спектральної чутливості зорового аналізатора при адаптації на еквівалентні яскравості L_{e1} і L_{e2} . Оскільки спектральні характеристики відбиття зразків можуть бути різними навіть для одноколірних об'єктів, зберігається умова постійності відношення яскравостей.

3 ВИБІР НОРМОВАНОЇ ФОТОМЕТРИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Продуктивність світлотехнічних установок визначається щільністю ефективного потоку по освітлюваній (що опромінюється) поверхні. У загальному випадку освітлюваний об'єкт, що опромінюється, може мати довільну поверхню рельєфу. У цьому випадку розподіл освітленості (щільності опромінення) по окремих ділянках робочої поверхні, а також по поверхнях об'єктів спостереження, по-різному орієнтованих у просторі, визначиться розподілом і величиною яскравості в усіх напрямках простору щодо досліджуваної точки поля.

Напрямок випромінювання щодо досліджуваної точки простору визначається двома кутовими координатами: кутом α у меридіональній площині щодо вертикалі AT і кутом β в екваторіальній площині щодо площини меридіана, що проходить через точку простору, в якій розташоване око спостерігача (рис. 3.1, 3.2).

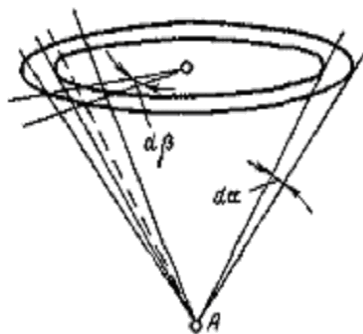
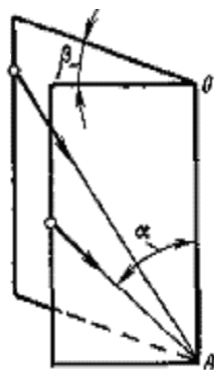


Рисунок 3.1 – Кутові координати Рисунок 3.2 – Елементарний тілесний кут

У прийнятій системі координат будь-яке випромінювання, що надходить з простору в точку A за напрямом γ, β , можна характеризувати яскравістю $L_{\gamma, \beta}$. Кожній точці простору A_i відповідає нескінченно велика сукупність напрямків γ і β , отже кожній точці простору відповідає нескінченно велика кількість елементарних пучків променів яскравістю $L_{\gamma, \beta}$ в напрямку до досліджуваної точки A_i .

Функція розподілу яскравості в просторі $L(\gamma, \beta)$ змінюється при переході від однієї точки простору A_i до іншої A_j і відбувається тим значніше, чим нерівномірніше розподіл яскравості в навколишньому просторі.

Оскільки нормована фотометрична характеристика повинна володіти не тільки універсальністю визначення умов освітлення, але і практичною прийнятністю, слід відмовитися від нормування L і прийняти для цілей нормування одну з інтегральних характеристик цієї функції.

Як показали А. А. Гершун, М. М. Гуревич [4,13], загальний вираз для інтегральної характеристики в досліджуваній точці світлового поля має такий вигляд:

$$c = \int_{4\pi}^0 L(v, \beta) f(v, \beta) d^2 \omega_{v, \beta}, \quad (3.1)$$

де $L(v, \beta)$ – функція напрямку, що визначає цінність випромінювання в напрямку v ; $d^2 \omega_{v, \beta}$ – тілесний кут, утворений двома конічними поверхнями з кутами розкриття v і $v+dv$ (рис.3.2) і поздовжніми площинами β і $(\beta+d\beta)$.

Отже, загальний вираз інтегральної характеристики світлового поля матиме вигляд

$$c = \int_{\beta=0}^{\beta=2\pi} \int_{v=0}^{v=\pi} L(v, \beta) f(v, \beta) \sin v dv d\beta. \quad (3.2)$$

Сферична освітленість, обумовлена середньою щільністю світлового потоку на поверхні сфери, що має зникаючий малий радіус, характеризується постійним значенням $f(v, \beta)$, чисельно рівним 0,25:

$$E_{4\pi} = 0.25 \int_{\beta=0}^{\beta=2\pi} \int_{v=0}^{v=\pi} L(v, \beta) \sin v dv d\beta = 0.5\pi \int_{v=0}^{v=\pi} L(v, \beta) f(v) \sin v dv, \quad (3.3)$$

де $L(v)$ – середнє значення яскравості в межах елементарного тілесного кута $2\pi \sin v dv$

$$L(v) = \frac{L(v)_{\beta_1} + L(v)_{\beta_2} + \dots + L(v)_{\beta_n}}{n}. \quad (3.4)$$

Величина середньої сферичної освітленості визначає об'ємну щільність світлової енергії в будь-якій точці A_c .

Тепер знайдемо напівсферичну освітленість:

$$E_{2\pi} = 0.5\pi \left(\int_{v=0}^{v=\pi} L(v) \sin v dv + \int_{v=0}^{v=\pi} L(v) \sin v \cos v dv \right) = E_{4\pi} + 0.25E_0. \quad (3.5)$$

Функція цінності випромінювання $f(v, \beta)$ для середньої напівсферичної освітленості, обертаючись у функцію тільки кута v , визначається наступною рівністю:

$$f(v) = 0.25(1 + \cos v). \quad (3.6)$$

Освітленість площини є також інтегральною характеристикою точки поля і напрямку, обумовленого нормаллю до площини:

$$E = \int_{v=0}^{v=0.5\pi} L(v) \sin v \cos v dv. \quad (3.7)$$

Циліндричну освітленість відповідно до загального виразу інтегральної функції можна визначити як середню щільність світлового потоку на циліндричній поверхні зникаюче малих розмірів (D і h):

$$E_u = 2 \int_{v=0}^{v=\pi} L(v) \sin^2 v dv, \quad (3.8)$$

де v – кут між віссю циліндричного приймача і досліджуваним напрямком.

Інтегральною характеристикою поля є також світловий вектор або вектор щільності опромінення

$$\vec{\varepsilon} = \int_{4\pi} L(v, \beta) d\vec{\omega} = \int_{\beta=0}^{\beta=2\pi} \int_{v=0}^{v=\pi} l_{v,\beta}^0 L(v, \beta) \sin v dv d\beta, \quad (3.9)$$

де $l_{v,\beta}^0$ – одиничний вектор напрямку випромінювання в досліджувану точку поля з точки з координатами v і β .

Для наближеної характеристики структури світлового поля прийнято користуватися відношенням різних інтегральних характеристик у досліджуваній точці поля, наприклад відношеннями $\frac{|\varepsilon|}{E_{4\pi}}, \frac{E_{\max}}{E_{4\pi}}, \frac{E}{4\pi}$ й ін., або градієнтом якої-небудь з інтегральних характеристик $grad \mathcal{L}_{4\pi}, grad \mathcal{L}_N$ або $grad \mathcal{L}_{2\pi}$ та ін.

Глибину тіні прийнято визначати відношенням величин освітленості в незатіненій і затемненій ділянках освітлюваної поверхні. Різкість тіні характеризують градієнтом зміни яскравості $\Delta L / L$ (кд/м²)·см у зоні переходу від затемненої ділянки поверхні до незатіненої. З огляду на кореляцію між наведеними відношеннями інтегральних характеристик поля і його тінеутворюючими властивостями можна ці відношення і градієнти використовувати для оцінки контрастності освітлення. Точність зорової роботи визначається мінімальними кутовими розмірами об'єктів розрізнення та їх яскравісними контрастами з фоном. Унаслідок залежності видимості й розрізнення об'єктів спостереження від яркості робочої поверхні при виборі нормованого значення освітленості необхідно враховувати коефіцієнт відбиття або коефіцієнт яскравості робочої поверхні.

4 НОРМУВАННЯ ЗА ВИДИМІСТЮ

Якщо тест-об'єкт рівнояскравий, ступінь його помітності на рівнояскравому фоні можна визначити яскравісним контрастом k , чисельно рівним відношенню різниці яскравості об'єкта і фону до яскравості тіла:

$$K = \frac{L_0 - L_\phi}{L_\phi} = \frac{\Delta L}{L_\phi}, \quad (4.1)$$

Шайкевичем А. С. [8,9] розроблені номограми, що дозволяють визначати швидкість розрізнення кільця Ландольта у функції яскравості фону, кутового розміру розриву кільця, контрасту й імовірності розрізнення. Контраст об'єкта з фоном, що забезпечує задану імовірність виявлення об'єкта, обумовлений його параметрами (кутовий розмір і форма), кількісною характеристикою освітлення (яскравість фону) і умовами зорової роботи (час спостереження), прийнято називати граничним контрастом:

$$k_{\text{нор}} = \frac{\Delta L}{L_\phi} = f(a, L_\phi, t, p), \quad (4.2)$$

де a – кутовий розмір об'єкта, хв;

$L_{\text{нор}}$ – гранична різниця яскравостей,

L_ϕ – яскравість фону;

t – час спостереження, с.;

p – імовірність зорового виявлення або упізнання форми об'єкта.

Зоровий поріг визначається граничними величинами кожного з трьох параметрів (a , k і t) для заданої імовірності і яскравості фону (p і L_ϕ).

За результатами дослідження Р. Блекуелла [10] залежність між граничним яскравісним контрастом й імовірністю виявлення об'єкта спостереження найпростішої форми (світлий диск на темному фоні) можна виразити рівністю

$$K_{\text{нор}(p)} = (K_{\text{нор}})_{0,5} f(p), \quad (4.3)$$

де $f(p) = 1 + \alpha\gamma$ – функція імовірності виявлення об'єкта спостереження;

$K_{\text{нор}}(p)$ – граничний контраст, що забезпечує задану імовірність виявлення p ;

$(K_{\text{нор}})_{0,5}$ – граничний контраст, що забезпечує імовірність $p = 0,5$;

α – постійний коефіцієнт ($\alpha = 0,68$ для виявлення при необмеженому часі спостереження і $p = 0,5$ для $t = 0,1$ сек);

γ – середнє квадратичне відхилення граничного яскравісного контрасту від середнього значення для $p = 0,5$.

Аналіз кривих залежності граничного контрасту виявлення тест-об'єкта у вигляді диска на фоні рівномірної яскравості з імовірністю $p = 0,5$ від яскравості тла для різних кутових розмірів диска $k_{nor} = f(\lg L_\phi)$ дозволяє зробити наступні висновки:

а) граничний контраст виявлення тест-об'єкта (рівнояскравісний диск на фоні рівномірної яскравості) залежить від кутового розміру об'єкта, яскравості фону й імовірності виявлення;

б) граничний контраст тест-об'єкта при заданій імовірності виявлення зменшується зі збільшенням кутового розміру об'єкта і яскравості фону;

в) кожному кутовому розміру тест-об'єкта відповідає деяка мінімальна величина граничного контрасту $K_{nor} = \zeta a$, при меншому значенні якого об'єкт не може бути виявлений при будь-якому якому завгодно великому значенні яскравості фону;

г) яскравість фону $L_\phi = L_{opt}$, починаючи з якої граничний контраст тест-об'єкта залишається практично постійним, прийнято називати оптимальною яскравістю, що забезпечує найбільшу видимість тест-об'єкта із заданим кутовим розміром;

д) нормовані значення яскравості (освітленості), що забезпечують задану вірогідність виявлення, впізнання або розрізнення тест-об'єкта, повинні бути тим більшими, чим менше його кутовий розмір і контраст із фоном.

5 ВИДИМІСТЬ І РОЗРІЗНЕННЯ

Видимість є відношенням контрасту об'єкта спостереження з фоном (у загальному випадку яскравісного або колірною) до граничного значення контрасту. У тих випадках, коли об'єкт спостереження одного кольору з фоном, видимість визначається відношенням яскравісних контрастів, фактичного або еквівалентного, до граничного. Еквівалентним контрастом об'єкта розрізнення складної форми або рельєфного об'єкта прийнято вважати контраст плоского рівнояркого диска, видимість якого в інтервалі яскравостей від L_i до L_j змінюється однаково з видимістю досліджуваного об'єкта.

Для максимального наближення значення видимості до кількісного виразу зорового процесу слід вибирати масштаб кількісного виразу видимості логарифмічним. Видимість об'єкта спостереження одноколірного з фоном v при цьому слід оцінювати логарифмом відношення десятикратного значення фактичного яскравісного контраста об'єкта з фоном до його практичного граничного значення $K_{\text{нор}}$:

$$v = \lg \frac{10K}{CK_{\text{нор}}}, \quad (5.1)$$

де C – коефіцієнт запасу (за Блекуелом $C = 1,8-2$).

У деяких випадках зорове завдання полягає не тільки у виявленні об'єкта спостереження, але також і в розрізненні його форми. Кількісну характеристику цього різновиду зорових завдань прийнято називати розрізненням.

При зіставленні умов освітлення, а також при виборі рівня яскравості або освітленості робочої поверхні, прийнято керуватися методом оцінки видимості, з огляду на коефіцієнт Вапаса з підвищенням труднощів зорового завдання, що залежить не тільки від невизначеності місця появи об'єктів, а й в не меншій мірі від форми об'єкта розрізнення.

Граничне максимальне значення видимості об'єкта із заданим кутовим розміром $v_{\text{макс}}$ визначається відношенням, фактичного яскравісного контрасту до гранично мінімального його граничного значення ξ_a :

$$v_{\text{макс}} = \lg \frac{10K}{C\xi_a}. \quad (5.2)$$

У загальному випадку для заданого значення імовірності p виявлення об'єкта спостереження видимість визначається як

$$v_p = \lg \frac{10K}{CK_{\text{нор}}f(p)}; \quad (5.3)$$

Тоді граничне значення видимості має вигляд

$$v_{p\max} = \lg \frac{10K}{C\xi_a f(p)}. \quad (5.4)$$

Відносна видимість

$$v_0 = \frac{v_p}{v_{p\max}} = \frac{1 + \lg K - \lg C - \lg K_{\text{нор}} - \lg f(p)}{1 + \lg K - \lg C - \lg \xi_a - \lg f(p)}. \quad (5.5)$$

Відносне значення граничного контрасту $K_{\text{нор}}/\xi_a$, необхідного для забезпечення заданого рівня відносної видимості:

$$\frac{K_{\text{нор}}}{\xi_a} = \left[\frac{K}{C\xi_a f(p)} \right]^{1-v_0}, \quad (5.6)$$

де $K_{\text{нор}}$ і ξ_a – порогові значення контрасту для ймовірності виявлення $p = 0,5$.

C – коефіцієнт запасу, що встановлює практичне значення граничного контрасту.

6 НОРМУВАННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ЗА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

6.1 Загальні положення

Показником економічної ефективності капітальних вкладень у порівнювані варіанти технічних рішень проєкту прийнято мінімум *приведених витрат*, що являють собою по кожному варіанту суму капітальних витрат K і річних експлуатаційних витрат C протягом нормативного строку окупності капітальних витрат T , вираженого в роках. Найбільш вигідним є той варіант, для якого значення $K + Ct$ буде найменшим.

Строком окупності капітальних витрат прийнято вважати час, протягом якого різниця капіталовкладень для двох порівнюваних варіантів установки ($K_2 - K_1$) окупається за рахунок економії засобів, що витрачаються на експлуатацію більш дорогої установки:

$$T=(K_2 - K_1)/(C_1 - C_2), \quad (6.1)$$

де T – строк окупності, роки;

K_1 і C_1 – капітальні витрати і річна вартість експлуатації менш капіталомісткого варіанта установки ($K_1 < K_2$), грн.;

K_2 і C_2 – капітальні витрати й річна вартість експлуатації установки з меншими експлуатаційними річними витратами ($C_1 > C_2$), грн.

Техніко-економічне зіставлення порівнюваних варіантів освітлювальних установок має сенс лише в тому випадку, коли більш капіталомісткий варіант характеризується меншими експлуатаційними витратами. Для одночасного зіставлення декількох варіантів освітлювальної установки

$$C_i + K_i/T_n = \min, \quad (6.2)$$

де T_n – нормативний строк окупності за *Дст* $T_n = 8,3$ роки.

Суму витрат на експлуатацію i -й освітлювальної установки C_i й щорічного відрахування на покриття капітальних витрат протягом нормативного строку окупності прийнято називати *приведеними витратами*:

$$C_i = C_i + P_n K_i = C_i + 0,12 K_i, \quad (6.3)$$

де C_i – приведені витрати i -го варіанта установки;

C_i – річні витрати на експлуатацію i -го варіанта установки;

P_n – нормативний коефіцієнт ефективності (при $T_n = 8,3$ $P_n = 1/8,3 = 0,12$);

K_i – капітальні вкладення i -го варіанта освітлювальної установки.

$(C_i - 0,12K_i)/N_i = Z_i$ – питомі приведені витрати на одну партію виробів, де N_i – кількість партій (штук) виробів, що випускаються за певний проміжок часу (тиждень, місяць).

При зіставленні двох варіантів за (6.1) умови більшої економічності першого варіанта визначаються нерівністю

$$\frac{C_1 + P_n K_1}{N_1} > \frac{C_2 + P_n K_2}{N_2} \quad (6.4)$$

або

$$\frac{C_1 + P_n K_1}{N_1} < \frac{C_2 + P_n K_2}{N_2}, \quad (6.5)$$

Оптимальним за техніко-економічними показниками буде той варіант, у якого питомі приведені витрати мінімальні:

$$C_i + P_n k_i = S_{i \text{ хв}}, \quad (6.6)$$

де $C = C_i/N_i$ – собівартість одиничної партії виробів;

$k_i = K_i/N_i$ – питома щорічне відрахування на покриття капітальних витрат, віднесене до однієї партії виробів.

Найкращий варіант освітлювальної установки в приміщеннях суспільного призначення з декількох варіантів проекту з однаковими якісними й кількісними показниками, що задовольняють діючим правилам і нормам штучного освітлення, можна користуватися рівнянням (6.6).

Викладена методика вибору оптимального варіанта освітлювальної установки за мінімумом приведених витрат є застосовною як для техніко-економічного зіставлення варіантів освітлювальних установок на стадії їхнього проектування, так і для вибору економічно оптимальних норм освітленості робочих поверхонь, а також якісних показників освітлення в процесі розробки правил і норм освітлення.

6.2 Техніко-економічні характеристики установок за укрупненими показниками

У цьому разі нормується освітленість, а не яскравості. Показники характеризуються точністю зорової роботи (кутовий розмір об'єкта розрізнення та його яскравий контраст k із фоном) і коефіцієнтом відбиття робочої поверхні. Введення в норми третьої характеристики зорового процесу ρ обумовлюється необхідністю встановлення відповідності нормованої величини освітленості та яскравості, що визначає рівень зорової працездатності.

Критерії ефективності освітлювальних установок:

а) для рівня освітленості – відносна видимість;

б) для оцінки якості освітлення – відносна зміна граничного контрасту.

Відносна видимість $v_0 = 0,7$.

Розмір об'єкта спостереження і його контраст з фоном визначаються за еквівалентним значенням K_e й a_e . Малий при $K_e < 0.2$; середній $0.2 \leq K_e \leq 0.5$, великий $K_e > 0.5$.

Робочі поверхні є фоном, на якому об'єкт зорovo виявляється і впізнається, класифікуються за трьома групами: темні ($\rho < 0.2$), середні ($0.2 \leq \rho \leq 0.4$) і світлі ($\rho > 0.4$).

Кутові розміри об'єктів спостереження, виражені в кутових хвилинах, групують за їх лінійними розмірами, приймаючи відстань від об'єкта до ока спостерігача 0,35–0,5 м, що дозволяє лінійний розмір 0,1 мм прибрати еквівалентним кутовому розмірові – кутовій хвилині.

1. Об'єкти розрізнення класифікують за розмірами на 6 розрядів. До розряду найвищої точності відносяться роботи, при яких еквівалентний розмір об'єктів розрізнення менший за 0,15 мм, що відповідає кутовому розміру об'єкта спостереження $\alpha < 1,5'$, при відстані його від ока спостерігача $l = 0,33$ м, що є нормальним для некоммодованого елементарного ока.

2. Контраст об'єкта з фоном, зменшення якого ускладнює зорове завдання, отже, вимагає для забезпечення обраної відносної видимості $v_0 = 0.7$ збільшення яскравості фону.

При нормуванні освітленості треба додатково до α і V_0 ввести в характеристику зорової роботи коефіцієнт відбиття робочої поверхні (фону).

Сумарна кількість ефективного освітлення:

$$H_{\text{эфф}} = \int_{t_1}^{t_2} a \lg L_{\Sigma}(t) dt, \quad (6.7)$$

де a – критерій чутливості, що залежить від рівня яскравості робочої поверхні й частки робочого часу, контрольованого зором;

L_{Σ} – сумарна яскравість робочої поверхні, обумовлена освітленістю, створюваною денним $E_{\text{дн}}$ і штучним E_u світлом:

$$L_{\Sigma} = \frac{\rho(E_{\text{дн}} + E_u)}{\pi}, \quad (6.8)$$

де t_1 і t_2 – час початку і кінця розрахунку.

Загальний рівень норм штучного освітлення забезпечує відносну видимість у межах 0,7–0,8 при вірогідності виявлення об'єктів зорового завдання $p = 0,7$. Подальше підвищення зорових функцій (видимість, швидкість розрізнення, зорова працездатність та ін.) приводить до різкого збільшення норм освітленості. Збільшення зорової працездатності за Вестоном з 0,9 до 0,95 вимагає підвищення норм у 3 рази, а з 0,95 до 0,98 – повторного потроєння. При сучасних значеннях світлової віддачі джерел світла і ККД світлових приладів у деяких випадках збільшення норм освітленості є нерентабельним.

6.3 Освітлення і продуктивність праці

Ф. Мосс [1] представив функцію зору наступним рівнянням:

$$\frac{1}{t} = d + b \lg(L_{\phi} - C), \quad (6.9)$$

де d , b і C – параметри, які обумовлені складністю зорової задачі і діапазоном яскравості L_{ϕ} .

Залежності продуктивності праці від яскравості дозволяють у першому наближенні прийняти

$$\Delta P_{ij} = a_{ij} \Delta \lg L_{ij}, \quad (6.10)$$

де ΔP_{ij} – приріст продуктивності праці;

$\Delta \lg L_{ij}$ – збільшення логарифма яскравості робочої поверхні від $\lg L_i$ до $\lg L_j$;

$$a_{ij} = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta \lg L_{ij}}, \quad (6.11)$$

де a_{ij} – критерій чутливості за продуктивністю, що характеризує відносний приріст продуктивності праці в інтервалі яскравості $\Delta \lg L_{ij} < 1$.

Критерій чутливості за продуктивністю залежить від рівня яскравості робочої поверхні, структури виробничого процесу й параметрів зорової роботи. Критерій чутливості зменшується для будь-якої зорової роботи зі зростанням яскравості робочої поверхні. При високих рівнях яскравості значення a_{ij} прагне до нуля. При визначенні критерія чутливості за продуктивністю $a_{ij} = \Delta P_{ij} / \Delta \lg L_{ij}$ можна скористатися результатами дослідження Вестона:

$$a_L = \frac{\Delta \eta_{\beta}}{\Delta \lg L_{ij}} = \frac{\Delta \eta_{\beta}}{\Delta \lg \frac{L_1}{L_2}}, \quad (6.12)$$

де a – приріст зорової працездатності при збільшенні яскравості від L_1 до L_2 .

Критерій чутливості, за Вестоном, визначається кутовим розміром об'єкта спостереження, його контрастом і рівнем яскравості робочої поверхні (рис 6.1).

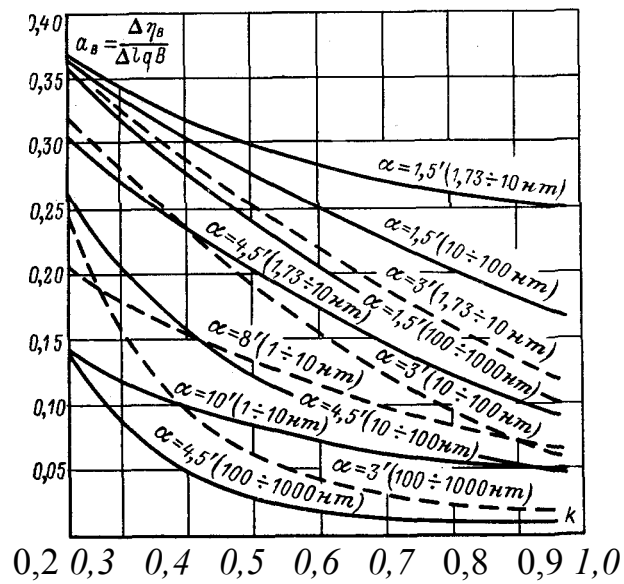


Рисунок 6.1 – Залежність критерію чутливості за Вестоном від параметрів об'єкта спостереження і рівня яскравості робочої поверхні

Характер цих залежностей враховано в галузевих стандартах, що регламентують параметри освітлювальних установок.

7 ЕНЕРГОАУДИТ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Важливою складовою системи енергетичного менеджменту є енергоаудит – відправна точка розвитку програми підвищення енергоефективності будь-якого підприємства, установи або міста.

Енергоаудит – це обстеження освітлювальної установки підприємства з метою визначення раціональності енерговикористання, оцінки потенціалу енергозбереження та розробки найбільш ефективних способів його реалізації.

Резервом економії електроенергії і підвищення ефективності її використання в діючих ОУ є :

- реконструкція фізично- і морально застарілих ОУ;
- вдосконалення управління ОУ, спрямоване на їх своєчасне включення і виключення з урахуванням часу роботи технологічного обладнання (обідня перерва, початок і кінець зміни), а також відключення частини ОУ при достатньому природному освітленні і використанні автоматичного управління ОУ;
- вжиття заходів щодо зниження перенапруг в освітлювальних мережах
- використання світлодіодних ламп замість звичайних ЛЛ при роботі їх в умовах підвищеної температури, використання енергоефективних ОП.

Керівні матеріали з енергоаудиту і технічної політики з енергозбереження

Закон України «Про енергозбереження», Типова методика «Загальні вимоги до організації та проведення енергетичного аудиту».

Методологія енергоаудиту (ЕА) складається з 7 основних етапів:

I. *переддоговірний* – має передбачати зустріч представника потенційного Виконавця з Замовником, попереднє ознайомлення представника з об'єктом ЕА, відвідування енергоаудиторами об'єкта, що споживає ПЕР, отримання первинної інформації, її аналіз і розробка плану ЕА;

II. *організаційно-підготовчий* – має передбачати узгодження плану проведення ЕА з Замовником, підписання договору на проведення ЕА, визначення осіб з боку Замовника для участі в проведенні ЕА, підготовка енергоаудиторської групи, формування наказу по об'єкту;

III. *збирання інформації* – має передбачати ознайомлення з документальною інформацією та проведення вимірювань на об'єкті ЕА;

IV. *переддоговірний* – має передбачати зустріч представника потенційного Виконавця з Замовником, попереднє ознайомлення представника з об'єктом ЕА, відвідування енергоаудиторами об'єкта, що споживає ПЕР, отримання первинної інформації, її аналіз і розробка плану ЕА;

V. *організаційно-підготовчий* – має передбачати узгодження плану проведення ЕА з Замовником, підписання договору на проведення ЕА, визначення осіб з боку Замовника для участі в проведенні ЕА, підготовка енергоаудиторської групи, формування наказу по об'єкту;

VI. *збирання інформації* – має передбачати ознайомлення з документальною інформацією та проведення вимірювань на об'єкті ЕА;

Типова методика «Загальні вимоги до організації та проведення енергетичного аудиту» (розділ Г.1.7 Система освітлення):

1. Об'єкти енергоаудиту:

- система зовнішнього освітлення;
- система внутрішнього освітлення;
- електричні освітлювальні пристрої;
- освітлювальна мережа.
- Задачі енергоаудитора:
 - оцінити втрати електроенергії в освітлювальній мережі;
 - визначити планову величину електроспоживання освітлювальними установками;
 - скласти баланс електроспоживання освітлювальними установками;
 - оцінити ефективність режиму роботи освітлювальних установок;
 - визначити потенціал енергозбереження;
 - розробити рекомендації з впровадження енергозберігаючих заходів.
- Документальна інформація
 - проєктні рішення по системі освітлення;
 - експлуатаційна документація.
- Параметри, що вимірюються:
 - Розміри території та приміщень,
 - висота підвісу світильників,
 - відстань між рядами світильників,
 - освітленість,
 - активна потужність,
 - напруга.

2. Дії енергоаудитора

провести зовнішній огляд елементів системи освітлення;

визначити:

- наявність проєктної документації і ознайомитися з нею;
- режим роботи системи освітлення;
- рік установки світильників;
- нормований рівень освітленості на робочій поверхні;
- періодичність чищення світильників;

побудувати:

- план розміщення і схему живлення освітлювальних установок;
- добові графіки напруги на вводах щитів живлення освітлення;

здійснити вимірювання:

- рівнів освітленості на робочих місцях, проходах і місцях загального користування;
- рівнів напруги на затискачах світильників;

розрахувати:

- втрати напруги в системі освітлення;
- річне електроспоживання освітлювальними установками об'єкта в цілому;

проаналізувати:

- фактичний стан світильників (забруднення, технічний знос);
- рівні фактичного освітлення;
- необхідність переходу на інші типи світильників;
- надійність живлення робочого і аварійного освітлення;
- ефективність використання встановлених освітлювальних установок;
- способів автоматизації системи освітлення.

3. Рекомендації щодо впровадження енергоощадних заходів

- використання природного і місцевого освітлення;
- замінювання неефективних світильників і ламп на більш економічні;
- секціонування освітлювальних мереж;
- установлення енергоефективної пуско–регулюючої апаратури;
- установлення локальної системи керування освітленням (датчиків присутності, датчиків освітленості, таймерів);
- впровадження автоматичного керування системою освітлення;
- фарбування внутрішніх приміщень у світлі кольори;
- регулярне чищення світильників і вікон.

8. НОРМУВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ОСВІТЛЕННЯ

Основними якісними характеристиками світлового середовища, що створюється освітлювальними системами, є:

- 1) показник засліплення (переважно для промислових ОУ)
або
показник дискомфорту (переважно для суспільно–адміністративних ОУ);
- 2) циліндрична освітленість
- 3) коефіцієнт пульсації.

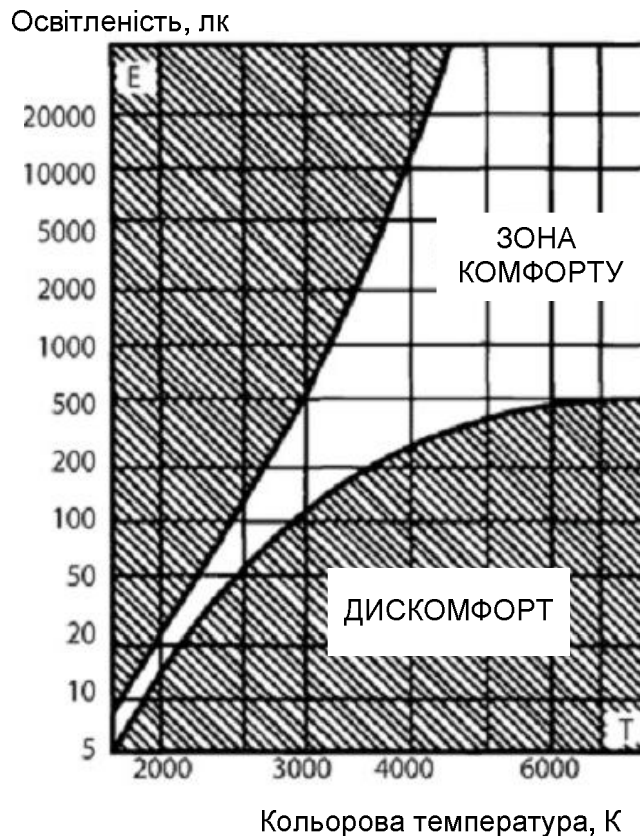


Рисунок 8.1 – Залежність комфортного рівня освітленості від кольорової температури джерела світла

8.1 Показник засліпленості

В ДБН значна увага приділяється важливому фактору якості освітлення, який негативно впливає на зір, – блискісті. Блискість створюється надмірно яскравими частинами джерел світла і світильників, що потрапляють в поле зору працівників (пряма блискість) або їх дзеркальним відбиттям від розглядаємої поверхні (відбита блискість). Таким чином, блискість є властивістю кожної ОУ. Дія блискісті на очі створює засліпленість, що заважає їх нормальній роботі.

Властивість світлових поверхонь, що викликає при відповідному рівні їх яскравості в полі зору, деяке зниження видимості прийнято називати

блискістю. Стан ока в результаті впливу блискості, що проявляється в зміні здатності бачити називається засліпленістю.

В усіх нормативних галузевих документах промислового освітлення передбачається регламентація вимог до обмеження засліпленості.

Засліпленість обумовлюється наступними параметрами ОУ:

- 1) яскравість джерел світла і частин світильників, що світяться;
- 2) яскравістю поля зору або тла (фону), на якому видне блиске джерело;
- 3) розміром блискового джерела і відстанню його до очей;
- 4) Освітленість на зіниці ока, що створюється його ока;
- 5) Положенням джерела блискості в полі зору працівника, що характеризуються кутом дії θ ;
- 6) Часом дії блискості.

В якості критерія засліпленості , викликаной блиским джерелом світла, прийнята зміна порогової різниці яскравості об'єкта і фона при наявності блискості. Було введено поняття коефіцієнта засліпленості, яке характеризується зміною видимості внаслідок дії блискості.

Яскравість окремих ділянок полю зору неоднакова. Розподіл яскравості в межах поля зору визначається не тільки розходженням коефіцієнтів яскравості або коефіцієнтів відбиття окремих ділянок поля зору, але також розподілом світлового потоку на освітлюваних поверхнях і наявністю в полі зору світлових приладів, рис 8.2.

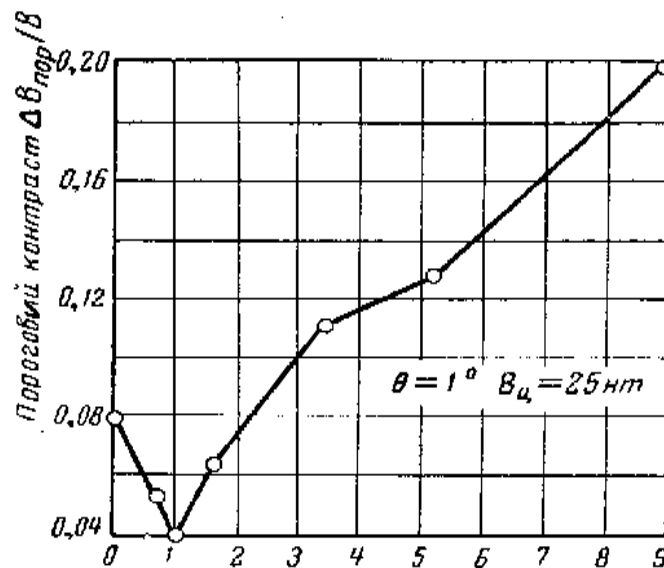


Рисунок 8.2 – Крива порогового контрасту в межах поля зору

Вплив нерівномірності розподілу яскравості позначається на граничній різниці яскравості $\Delta L_{\text{пор}}$.

Підвищення граничної різниці яскравості, а також зниження швидкості розрізнення та інших функцій зору при наявності на периферії підвищеної яскравості в порівнянні з яскравістю центральної частини поля зору прийнято пояснювати виникненням *вуалюючої завіси*.

Модель *вуалюючої завіси* за Холледеем заснована на еквівалентному врахуванні підвищення граничної різниці яскравості з появою в полі зору спостерігача блискowego джерела:

$$\frac{(\Delta L_{nor})_s}{\Delta L_{nor}} = \frac{L_{ad} + \beta}{L_{ad}}, \quad (8.1)$$

де ΔL_{nor} – гранична різниця яскравості об’єкта на фоні рівномірної яскравості,

$(\Delta L_{nor})_s$ – те ж при наявності в полі зору блискowego джерела;

L_{ad} – яскравість адаптації;

β – яскравість завіси, що вуалює.

Відношення граничних значень різниці яскравості об’єкта і фона при наявності в полі зору спостерігача блискowych джерел $(\Delta L_{nor})_s$ і при рівномірній яскравості всього поля зору ΔL_{nor} прийнято називати *коефіцієнтом засліпленості*.

$$S = \frac{(\Delta L_{nor})_s}{\Delta L_{nor}} = 1 + \frac{\beta}{L_{aa}} \approx 1. \quad (8.2)$$

На практиці користуються показником засліпленості (рис 8.3).

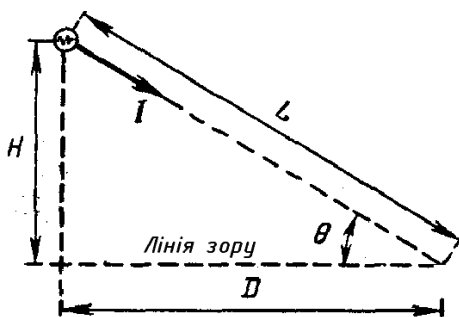


Рисунок 8.3 – До розрахунку показника засліпленості

$$s = (S - 1) \cdot 10^3. \quad (8.3)$$

Яскравість *вуалюючої завіси*, створеної точковим випромінювачем, розташованим у полі зору спостерігача, визначається освітленістю площини зіниці ока *спостерігача* E й θ кутом між лінією зору та променем від блискучого джерела в напрямку до ока спостерігача:

$$\beta = m \frac{E_{zp}}{\theta^2}, \quad (8.4)$$

де E – освітленість площини зіниці ока спостерігача, лк

θ – угод дії блискості, *град*;

β – яскравість вуалюючої завіси;

m – постійний коефіцієнт, що залежить від яскравості блисквого джерела.

Дослідження яскравості вуалюючої завіси, створюваної блисквим джерелом $\theta_{при} = const$ показали деяке розходження β значень для різних поздовжніх ψ площин, рис 8.4.

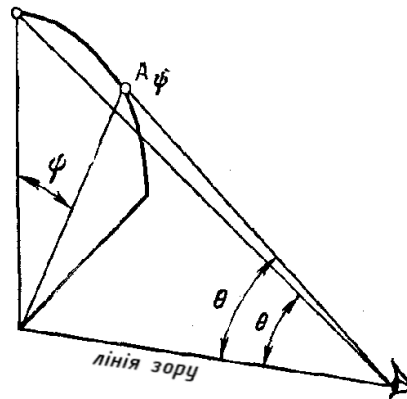


Рисунок 8.4 – Лінія зору при визначенні яскравості вуалюючої завіси

При наявності в полі зору декількох джерел блискості сумарне значення яскравості завіси, що β вуалює, за МКО визначається за правилом аддитивності яскравості вуалюючої завіси, створюваної окремими джерелами:

$$\beta_{\Sigma} = m \left(\frac{E_1}{\theta_1^2} + \frac{E_2}{\theta_2^2} + \dots + \frac{E_n}{\theta_n^2} \right), \quad (8.5)$$

де E_1, E_2, E_n – освітленості на зіниці ока спостерігача, створювані кожним джерелом блискості, розташованим в полі зору спостерігача;

$\theta_1, \dots, \theta_n$ – кути між лінією зору спостерігача і випромінюванням кожного джерела блискості в напрямку до ока спостерігача.

Для лінійних джерел

$$\beta = m \int \frac{dE_{зр}}{\varpi^2}, \quad (8.6)$$

де $dE_{зр}$ – освітленість на зіниці ока спостерігача, створювана нескінченно малою ділянкою довжини dl випромінюючої лінії.

Як показали дослідження, результуюче значення яскравості вуалюючої завіси, від n джерел блискості, розташованих у полі зору спостерігача, не підпорядковане закону аддитивності:

$$\beta_{\Sigma} = \left[\sum \beta_i^{3/2} \right]^{2/3}. \quad (8.7)$$

Яскравість вуалюючої завіси від лінійних випромінювачів (ряду світильників з люмінесцентними лампами) відповідно визначається так:

$$\beta_{\Sigma} = (3 \lg L - 8.54) \left[\int \left(\frac{dE_{zp}}{\theta^2} \right)^{3/2} \right]^{2/3}. \quad (8.8)$$

Ряди світильників в освітлювальній установці, як правило, розташовуються паралельно (а), або перпендикулярно (б) до лінії зору спостерігача, рис. 8.5.

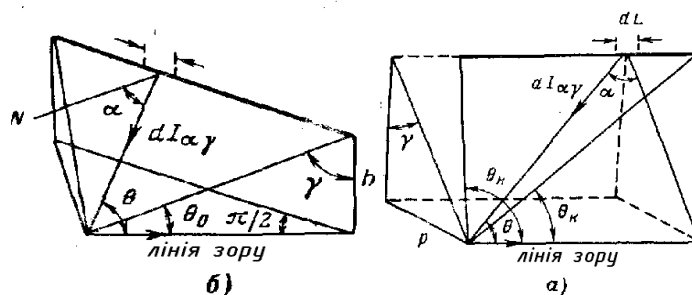


Рисунок 8.5 – Схеми розрахунку показника засліплення в залежності від взаємного розташування рядів світильників і лінії зору:
а – при паралельному розташуванні; б – при перпендикулярному розташуванні

Для лінії зору, рівнобіжної рядів світильників, освітленість зіниці ока спостерігача від елемента ряду світильників із світлорозподілом $I_{\alpha\gamma} = I_{\gamma} \cos \alpha$ визначиться як

$$\Delta E_{zp} = \frac{\Delta I_{\gamma} \cos \gamma \cos \theta}{l^2} dL, \quad (8.9)$$

де ΔI_{γ} – сила світла з одиниці довжини ряду світильників у поздовжній площині v в перпендикулярному напрямку до осі ряду ($\alpha = 0$);
 l – відстань елементарної ділянки ряду світильників від ока спостерігача;
 α – кут, що координує випромінювання елементарної ділянки ряду d у поздовжній площині γ в напрямку до ока спостерігача;
 $\cos \alpha$ – функція світлорозподілу світильників у поздовжній площині.

Замінивши в рівняннях (8.9) значення l , L й dL

$$l = \frac{\sqrt{h^2 + p^2}}{\sin \theta}; \quad L = \operatorname{ctg} \theta_1 \sqrt{h^2 + p^2}; \quad dL = \frac{\sqrt{h^2 + p^2}}{\sin^2 \theta} d\theta, \quad (8.10)$$

одержимо вираз, що визначає яскравість вуалюючої завіси, створюваної рядом світильників з люмінесцентними лампами, розташованими уздовж лінії зору:

$$\beta = \frac{3 \lg L - 8.54}{\sqrt{h^2 + p^2}} \Delta I_{\gamma} \left[\int_{\theta_n}^{\theta_k} \left(\frac{\sin \theta \cos \theta}{\theta^2} \right)^{3/2} d\theta \right]^{2/3} \quad (8.11)$$

Розв'язання (8.28) можливе шляхом розкладання $\sin \theta$ й $\cos \theta$ в ряди:

$$\sin \theta = \frac{\theta}{1!} - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \quad \cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots \quad (8.12)$$

Користуючись цим методом, одержимо:

а) для розташування лінії зору уздовж ряду

$$\beta_{\Pi} = \frac{3 \lg L - 8.54}{2060 \sqrt{h^2 + p^2}} \Delta I_{\gamma} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\theta_k}} - \frac{1}{\sqrt{\theta_n}} \right) - (\sqrt{\theta_n^3} - \sqrt{\theta_k^3}) 10^{-4} \right]^{2/3} \quad (8.13)$$

б) для розташування лінії зору впоперек ряд

$$\beta_{\perp} = \frac{(3 \lg L - 8.54) \cos^2 \theta_0}{5.63 p} \Delta I_{\gamma} \left\{ \frac{(2200 + \theta_0^2) \alpha}{2200 \theta_0^2 \sqrt{\theta_0^2 + \alpha^2}} - \frac{1}{2200} \left[\ln \left(l + \sqrt{\theta_0^2 + \alpha^2} \right) - \ln \theta_0 \right] \right\}^{2/3} \quad (8.14)$$

Нормовані значення показників засліпленості обрані не перевищуючими $s = 20$ для точних зорових робіт і $s = 40$ для роботи меншої точності.

9 ПОКАЗНИК ДИСКОМФОРТУ

9.1 Загальні положення розрахунку показника дискомфорту

Зоровий дискомфорт визначається як відчуття незручності або напруженості. Це відчуття виникає в результаті наявності в полі зору світлових плям з яскравістю, що значно перевищує яскравість адаптації спостерігача. Світ поділяє всі явища на дві групи:

- а) засліплюючий ефект блисків джерел;
- б) дискомфорт з появою блисків в полі зору.

На основі експерименту П. Неттінг [13] сформулював математичний вираз залежності дискомфортної яскравості від яскравості фона, що визначає рівень адаптації спостерігачів:

$$IgL_{\partial} = 3,45 + 0,32lgL_{ad} \quad (9.1)$$

де L_{∂} – дискомфортна яскравість;

L_{ad} – яскравість адаптації.

У розвиток робіт Неттінга Холледей [14] досліджував суб'єктивне відчуття плями підвищеної яскравості, що з'являється на адаптаційному фоні рівномірної яскравості L_{ad} , яка варіює у межах 0,3–320 кд/м². Кутовий розмір плями підвищеної яскравості за діаметром в процесі експерименту варіювався від 18' до 7°. Сліпуча пляма у всіх дослідах розташовувалося поблизу центра поля адаптації. Для порівняльної оцінки виникаючого відчуття Холледей запропонував наступне рівняння:

$$N = a + lgL_{\partial} + 0,25lg\omega - 0,3lgL_{ad}, \quad (9.2)$$

де a – постійна, залежна від вибору одиниць яскравості;

L_{∂} – яскравість досліджуваної засліплюючої плями;

ω – тілесний кут засліплюючої плями, *стер*;

L_{ad} – яскравість адаптації;

N – критерій, що визначає рівень відчуття:

$N = 0,30$ – ледь помітно;

$N = 0,60$ – найбільше приємно;

$N = 0,90$ – на грані приємного і байдужного;

$N = 1,20$ – байдуже;

$N = 1,90$ – на межі байдужного і неприємного;

$N = 2,2$ – трохи неприємно;

$N = 2,4$ – неприємно;

$N = 2,6$ – на грані нестерпно неприємного;

$N = 2,8$ – неприємно і болісно, рис 9.1.

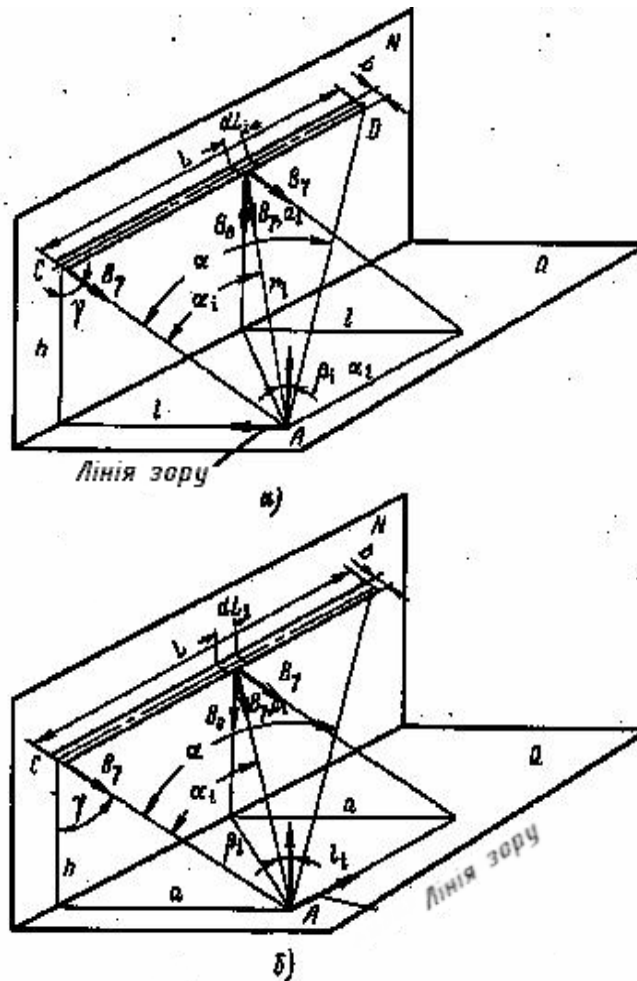


Рисунок 9.1 – До розрахунку показника дискомфорту від світлових ліній при перпендикулярному (а) і паралельному (б) розташуванні лінії зору

Рівняння (9.2), що визначає кількісний критерій зорового відчуття світлої плями на більш темному фоні, можна написати у формі, більш зручній для практики:

$$C = L_o(\omega^n/L_{ao}^m), \quad (9.3)$$

де $C=10^{N-a}$ – критерій рівня зорового відчуття.

Подальші дослідження кількісної характеристики зорових відчуттів на границі комфорт – дискомфорт проводили щодо уточнення показників n , m і C , а також вивчення закону додавання відчуттів від сукупності декількох світлових плям і їхнього розташування в полі зору спостерігача.

Розрахунок показника дискомфорту від світної лінії, перпендикулярної до лінії зору.

Розрахунок показника дискомфорту від світної лінії рівнобіжної лінії зору.

На основі експериментів отримана залежність дискомфоротної яскравості L_o від яскравості фону, що визначає рівень адаптації L_{ao} тілесного кута світлої

плями ω , що викликає виникнення дискомфорту, і кутового зсуву θ світлої плями щодо лінії зору спостерігача:

$$L_{\partial} = M \varphi(\theta) \sqrt{\frac{L_{ad}}{\omega}}, \quad (9.4)$$

де L_{∂} – яскравість світлої плями, що викликає дискомфорт;

M – показник дискомфорту;

$\varphi(\theta)$ – індекс позиції дискомфортної плями щодо лінії зору спостерігача;

L_{ad} – яскравість адаптації;

ω – тілесний кут дискомфортної плями, *стер.*

Показник дискомфорту M визначається імовірністю p оцінки відчуття потемніння фону при заданих значеннях L_{ad} , ω , θ . При імовірності $p = 0,5$ показник дискомфорту для досліджених меж варіацій ω , θ і L_{ad} має значення $M = 25$. При імовірності $p = 0,5$

$$L_{\partial} = 25 \varphi(\theta) \sqrt{\frac{L_{ad}}{\omega}}, \quad (9.5)$$

Результати дослідження індексу позиції дозволили рекомендувати для практики проектування сімейства кривих постійних значень індексу позиції $p = f(a/l, h/l)$.

Для зіставлення норм обмеження дискомфорту і засліпленості побудований графік залежності показника засліпленості від показника дискомфорту (рис 9.2).

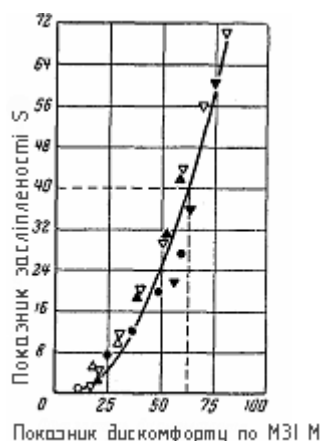


Рисунок 9.2 – Графік залежності показника засліпленості від показника дискомфорту

З цього графіка видно, що граничне значення показника дискомфорту для приміщень з підвищеними вимогами $M \leq 25$ відповідає показникові

засліпленості $s = 5-6$, що істотно нижче нормованих значень показника засліпленості для виробничих приміщень з точною роботою $s = 20-40$.

У практиці проектування освітлювальних установок доводиться оцінювати за дискомфортом установки з великою кількістю світлових приладів (рис 9.3) або великими за площею світними поверхнями (рис 9.4).

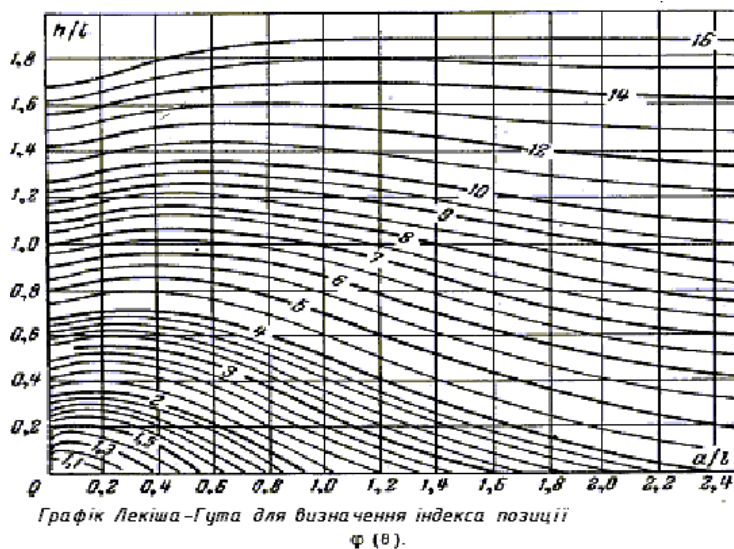


Рисунок 9.3 – Для визначення дискомфорту від установки з великою кількістю світлових приладів

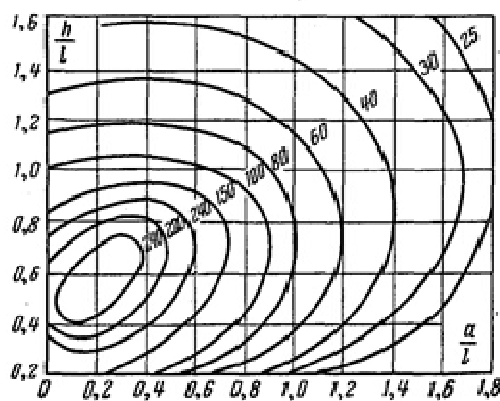


Рисунок 9.4 – Для визначення дискомфорту від великих за площею світних поверхонь

Результати дослідження дискомфорту, створюваного сукупністю декількох випромінювачів (від 2 до 20), розташованих у полі зору спостерігача під різними кутами θ , дозволили сформулювати правило додавання показників дискомфорту :

$$M_{\Sigma} = \left[\sum_{i=1}^{i=n} M_i^2 \right]^{0.5}.$$

Для сукупності точкових випромінювачів, розташованих у полі зору спостерігачів

$$M = \frac{1}{hL_{a0}^{0,5}} \left[\sum I_{\alpha} L_{\alpha} f^2(\theta) \right]^{0,5}, \quad (9.6)$$

де I_{α} , L_{α} – значення сили світла і середньої габаритної яскравості світлового приладу в напрямку до ока спостерігача;

h – висота розташування світлових приладів над рівнем ока спостерігача, м;

L – яскравість адаптації;

$f(\theta) = \frac{\sin \theta_a \cos \theta_z}{P}$ – функція положення світлового приладу щодо ока спостерігача;

P – індекс позиції за Гутом.

Для спрощення розрахунку сумарного значення показника дискомфорту освітлювальної установки на рисунку 9.4 наведені графіки $P_i(\theta)$ у функції a/l і h/l .

Показник дискомфорту від елементарної ділянки d смуги, що світить

$$dM_i = \left[\frac{L_{aij}^2 d\omega_i}{P_i^2 L_{a0}} \right]^{0,5}, \quad (9.7)$$

де L_{aij} – яскравість смуги, що світить, у напрямку до ока спостерігача;

$d\omega_i$ – тілесний кут елемента d смуги, що світить, з вершиною в точці розташування ока спостерігача;

L_{a0} – яскравість адаптації;

P_i – функція розташування елементарної ділянки смуги, що світить.

Перетворивши (9.5), з урахуванням (9.6) одержимо

$$M_i = \frac{b^{0,5}}{h^{0,5} L_{a0}^{0,5}} \cos \gamma \left[\int_0^a \frac{L_{\alpha i}^2}{P_i^2} \cos \alpha_i d\alpha_i \right]^{0,5} \quad (9.8)$$

$$d\omega_i = \frac{b \cos \beta_i}{r_i^2} dl_i; \quad r_i = \frac{h}{\cos \gamma \cos \alpha_i}; \quad dl_i = \frac{r_i}{\cos \alpha_i} d\alpha_i; \quad \cos \beta_i = \cos \alpha_i \cos \gamma, \quad (9.9)$$

де b – ширина смуги, що світить, м;

h – висота розташування смуги над рівнем ока спостерігача, м;

r_i – відстань від елемента смуги, що світить, d до ока;

γ і α_i – кути, що координують розташування елемента смуги відносно ока спостерігача.

Рішення (9.8) ускладнено завдяки змінності індексу позиції P_i для різних ділянок смуги, а також залежністю яскравості від кутів γ і α . Для світних смуг, перекритими розсіювачами, що мають об'ємне розсіювання, з достатньої для практики точністю можна прийняти $B_{\alpha\gamma}=B_0$ де B_0 — яскравість за напрямками $\alpha=0$ і $\gamma=0$. У цьому випадку індекс позиції можна прийняти рівним середньому геометричному з трьох значень P_i , що відповідають початку (P_n), середині (P_{cp}) й кінцеві (P_k) смуги, що світить:

$$P = \sqrt[3]{P_n P_{cp} P_k} . \quad (9.10)$$

Виносимо яскравість і середнє значення індексу позиції за знак інтеграла і проінтегрував рівняння, одержимо:

$$M = \frac{L_0 b^{0.5}}{h^{0.5} L_{ad}^{0.5}} \frac{\cos \gamma (\sin \alpha)^{0.5}}{p} . \quad (9.11)$$

Для смуг з екрануючими ґратками, світлорозподіл яких підпорядковується правилу $L_{\alpha\gamma} = L_0 \cos^{n-1} \alpha \cos^{m-1} \gamma$, одержимо

$$M = \frac{L_0}{p} \frac{b^{0.5}}{h^{0.5} L_{ad}^{0.5}} \cos^n \gamma \left[\int_0^a \cos^{(2m-1)} \alpha d\alpha \right]^{0.5} . \quad (9.12)$$

Для найбільш частих випадків, коли у поздовжній і поперечній площинах світної смуги однакові захисні кути рівні 30° , що відповідає $n = m = 2$, одержимо:

$$M = \frac{L_0}{p} \frac{b^{0.5}}{h^{0.5} L_{ad}^{0.5}} \cos^2 \gamma \left[\int_0^a \cos^3 \alpha d\alpha \right]^{0.5} . \quad (9.13)$$

Після інтегрування (9.13) одержимо

$$M = L_0 \left(\frac{b}{h L_{ad}} \right)^{0.5} \frac{\cos^2 \gamma}{p} \left[\sin \alpha - \frac{1}{3} \sin^3 \alpha \right]^{0.5} . \quad (9.14)$$

За допомогою графіка $P_i(\theta) = f(a/l; h/l)$ розраховані й побудовані графіки постійних значень:

$$f_{II}(\gamma, \alpha, P_{II}) = \frac{\cos^2 \gamma}{P} \left[\sin \alpha - \frac{1}{3} \sin^3 \alpha \right]^{0.5} ; \quad (9.15)$$

$$f_{\perp}(\gamma, \alpha, P_{\perp}) = \frac{\cos^3 \gamma}{P} \left[\sin \alpha - \frac{1}{3} \sin^3 \alpha \right]^{0.5}; \quad (9.16)$$

Критерій, що визначає засліплюючу дію освітлювальних установок, є показником дискомфорту. Звичайно він дорівнює 25–60 і тільки в особливих випадках (операційні, лікарняні палати, спальні кімнати в яслах і дитячих садах) – 15.

Основними параметрами освітлювальної установки є яскравість адаптації і розташування світлових приладів у полі зору. Яскравість адаптації визначається за умови переважного напрямку лінії зору за обрію. Наявність випромінюючих стель, панелей та інших світлових елементів архітектури значною мірою впливає на рівень яскравості адаптації.

9.2 Методика визначення UGR для стандартного спостерігача

Заважаючою зору побічною дією штучного освітлення є пряма і відбита блискість, що виникає за рахунок великого контрасту між дуже світлими і дуже темними поверхнями або при погляді на предмети, що світяться [7, 8].

Обмеження прямої блискості виконується об'єднаним показником дискомфорту UGR (Unified Glare Rating), прийнятим в міжнародній практиці для врахування сукупної дії всіх світильників в приміщенні.

Об'єднаний показник дискомфорту (Unified Glare Rating (UGR)) – міжнародний критерій оцінки дискомфортної блискості, що викликає неприємні відчуття при нерівномірному розподілу яскравостей в полі зору. Показник є безрозмірною величиною від 10 до 30, яку неможливо визначити фотометричними способами, можна тільки наближено обчислити.

Об'єднаний показник дискомфорту UGR згідно [3] визначається за формулою:

$$UGR = 8 \log \left[\frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \cdot \omega_i}{p_i^2} \right], \quad (9.17)$$

де L_a – яскравість фону, кд / м², що розраховується як добуток $E_{ind} \cdot \pi^{-1}$, в якому

E_{ind} – відбита вертикальна освітленість на рівні очей стандартного спостерігача.

L_i – габаритна яскравість світної частини і-того світильника в напрямку очей спостерігача, кд/м²;

ω_i – тілесний кут світних частин і-того світильника з точки спостереження, стер;

p_i – індекс позиції для і-того світильника, що враховує його розміщення щодо

лінії зору спостерігача;

N – кількість світильників в освітлювальній установці.

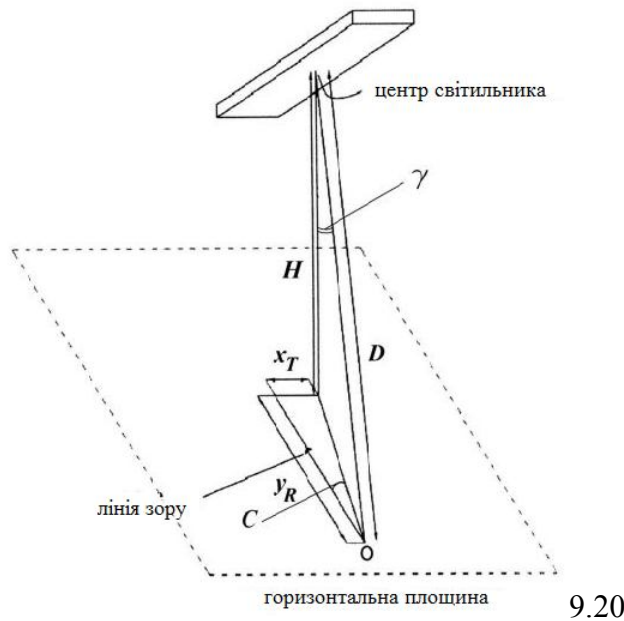


Рисунок 9.5 – Розташування центру світильника щодо стандартного спостерігача

Відбита вертикальна освітленість E_{ind} на висоті лінії зору стандартного спостерігача приймається рівною відбитій вертикальній освітленості стін E_{wid} на даній висоті:

$$E_{ind} = E_{wid}.$$

Для розрахунку об'єднаного показника дискомфорту UGR використовують формули, що визначають його через силу світла світильників в напрямку точки розташування стандартного спостерігача, значення якої містяться в фотометричних даних на світильник у форматі IES, в форматі LDT чи в стандартизованих таблицях сили світла, відстань від стандартного спостерігача до видимої площі світної поверхні світильника D , індекс позиції світильника p і відбиту освітленість стін на висоті лінії зору стандартного спостерігача E_{wid} :

$$UGR = 8 \log \sum_{i=1}^N \left[\frac{\pi}{4E_{wid}} \cdot \frac{I_{c\gamma i}^2 \cdot A_i}{A_i^2 \cdot D_i^2 \cdot p_i^2} \right]. \quad (9.18)$$

При введенні коефіцієнта K_i , що має вираз:

$$K_i = \frac{\pi}{4 \cdot p_i^2 \cdot D_i^2}, \quad (9.19)$$

рівняння для визначення UGR набуває наступного вигляду:

$$UGR = 8 \log \sum_{i=1}^N \left[\frac{K_i}{E_{WID}} \cdot \frac{I_{C\gamma i}^2}{A_i^2} \right], \quad (9.20)$$

$$UGR = 8 \log \sum_{i=1}^N \left[\frac{K_i \cdot I_{C\gamma i}^2}{A_i^2} \right] - 8 \log E_{WID}, \quad (9.21)$$

де $I_{C\gamma}$ – сила світла і-того світильника в напрямку стандартного спостерігача, визначається вертикальним кутом і азимутним кутом C в системі координат $OC\gamma$ з центром в точці розташування стандартного спостерігача за рисунком 9.5;

$$C = \arccos \frac{x_\gamma}{y_R}, \quad (9.22)$$

де y_R – азимутальний кут;

x_γ – меридиональний кут, що визначається як

$$\gamma = \arccos \frac{H}{D} \quad (9.23)$$

A – площа проекції світних поверхонь світильника на площину, перпендикулярну лінії зору відповідно до рисунку 9.6, яка визначається за формулами (9.24) при направленні лінії зору уздовж поздовжньої осі світильників і (9.25) при направленні лінії зору поперек поздовжньої осі світильників

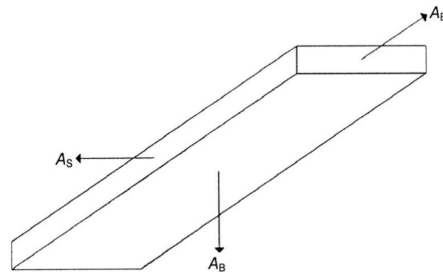


Рисунок 9.6 – Розташування світних поверхонь світильника, видимих стандартним спостерігачем

$$A = A_B \frac{H}{D} + A_s \frac{x_T}{D} + A_E \frac{y_R}{D}, \quad (9.24)$$

$$A = A_B \frac{H}{D} + A_s \frac{y_R}{D} + A_E \frac{x_T}{D}, \quad (9.25)$$

де $D = \sqrt{(H^2 + x_T^2 + y_R^2)}$.

Відбита складова освітленості на стінах приміщення визначається за формулою:

$$E_{WID} = \frac{F_{WID} \cdot N \cdot \Phi_0}{A_W} = B \cdot F_{UWID}, \quad (9.26)$$

де F_{UWID} – коефіцієнт використання відбитих світлових потоків для стін;
 N – кількість світильників в приміщенні;
 A_W – загальна площа стін, m^2 між робочою площиною і площиною розташування світильників;
 $\Phi_0 = 1000$ лм.

$$B = 1000 \cdot \frac{N}{A_W} \quad (9.27)$$

Розрахунок E_{WID} виконується на основі табличних значень сили світла $I_{C\gamma}$ в залежності від азимутального кута C з інтервалом в 15° (від 0° до 345°) і в залежності від меридіонального кута γ з інтервалом 5° (від 0° до 180°) в наступній послідовності.

Зональні потоки $\Phi_{z1.1}$, $\Phi_{z1.2}$, $\Phi_{z1.3}$ і $\Phi_{z1.4}$ визначаються за формулами (9.28):

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{z1.1} &= \Phi_{зон(0^\circ-40^\circ)} + 0,13 \cdot \Phi_{зон(40^\circ-50^\circ)} \\ \Phi_{z1.2} &= \Phi_{зон(0^\circ-60^\circ)} \\ \Phi_{z1.3} &= \Phi_{зон(0^\circ-70^\circ)} + 0,547 \cdot \Phi_{зон(70^\circ-80^\circ)} \\ \Phi_{z1.4} &= \Phi_{зон(0^\circ-90^\circ)} \end{aligned} \right\} \quad (9.28)$$

де $\Phi_{зон(0^\circ-40^\circ)}$, $\Phi_{зон(40^\circ-50^\circ)}$, $\Phi_{зон(0^\circ-60^\circ)}$, $\Phi_{зон(0^\circ-70^\circ)}$, $\Phi_{зон(70^\circ-80^\circ)}$ і $\Phi_{зон(0^\circ-90^\circ)}$ – зональні потоки в межах (від 0° до 40°), (від 40° до 50°), (від 0° до 60°), (від 0° до 70°), (від 70° до 80°), і (від 0° до 90°) відповідно.

Загальний зональний потік розраховується як

$$\Phi_{zL} = \Phi_{z1.1} \cdot F_{GL.1} + \Phi_{z1.2} \cdot F_{GL.2} + \Phi_{z1.3} \cdot F_{GL.3} + \Phi_{z1.4} \cdot F_{GL.4}, \quad (9.29)$$

де $F_{GL.1} \dots F_{GL.4}$ – геометричні фактори відповідно для кожної з зон, для яких розраховувалися зональні світлові потоки.

Визначення коефіцієнтів розподілу світлового потоку для площини стандартного спостерігача F_{DF} , для стін F_{DW} і для стелі F_{DC} виконується за формулами:

$$\begin{aligned} F_{DF} &= \frac{\Phi_{zL}}{\Phi_0}, \\ F_{DW} &= R_{DLO} - F_{DF}, \\ F_{DC} &= R_{ULO}, \end{aligned}$$

де R_{DLO} – коефіцієнт корисної дії світильника в нижню напівсферу,
 R_{ULO} коефіцієнт корисної дії світильника в верхню напівсферу.

Розраховується коефіцієнт використання для стін F_{UWID} :

$$F_{WID} = F_{DF} \cdot F_{T,FW} + F_{DW} \cdot (F_{T,WW} - 1) + F_{DC} \cdot F_{T,CW}, \quad (9.30)$$

де $F_{T,FW}$ – коефіцієнт передачі світлового потоку від розрахункової поверхні до стіни,

$F_{T,WW}$ – коефіцієнт передачі світлового потоку від стіни до стіни,

$F_{T,CW}$ – коефіцієнт передачі світлового потоку від стелі до стіни.

Як видно, з викладеного вище матеріалу, об'єднаний показник дискомфорту UGR залежить від безлічі факторів, основними [9] з яких є положення і кут огляду спостерігача; розташування світильників; рівень яскравості світильників; рівень яскравості фону; коефіцієнти обслуговування (приміщення, світильників). Щоб уникнути складних розрахунків існують спеціальні таблиці UGR для світильників [3]. Стандартна таблиця UGR світильника – таблиця значень об'єднаних показників дискомфорту (UGR), які можуть бути отримані при використанні даного світильника для освітлення приміщень, що мають розміри типових будівельних модулів. Зрозуміло, що використання таблиць полегшує завдання, але не гарантує точності результатів: занадто велике розмаїття досліджуваних приміщень і варіантів характеристик їх основних поверхонь [10, 11].

9.3 Оцінка об'єднаного показника дискомфорту в програмі DIALux

Таблиця значень об'єднаних показників дискомфорту, якщо можливо, будується DIALux за фотометричними даними автоматично, незалежно від того, чи виконувались розрахунки UGR, чи ні.

Место выхода света 1 / Диаграмма UGR

Оценка экранирования по UGR												
р Потолок	70	70	50	50	30	70	70	50	50	30	70	30
р Стенки	50	30	50	30	30	50	30	50	30	30	50	30
р Полы	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Место помещения		Направление взгляда поперек к оси ламп					Направление взгляда вдоль к оси ламп					
X	Y											
2Н	2Н	14.0	15.2	14.3	15.4	15.6	14.8	16.0	15.1	16.2	16.4	16.4
	3Н	15.0	16.0	15.3	16.2	16.5	15.8	16.8	16.1	17.1	17.4	17.4
	4Н	15.5	16.5	15.8	16.8	17.0	16.3	17.3	16.7	17.6	17.8	17.8
	6Н	16.0	16.9	16.4	17.2	17.5	16.8	17.7	17.1	18.0	18.3	18.3
	8Н	16.2	17.1	16.6	17.4	17.7	17.0	17.8	17.3	18.1	18.4	18.4
	12Н	16.4	17.2	16.7	17.5	17.8	17.1	17.9	17.4	18.2	18.5	18.5
4Н	2Н	14.5	15.5	14.8	15.7	16.0	15.1	16.1	15.4	16.3	16.6	16.6
	3Н	15.7	16.6	16.1	16.9	17.2	16.3	17.1	16.6	17.4	17.7	17.7
	4Н	16.5	17.2	16.9	17.5	17.9	16.9	17.7	17.3	18.0	18.4	18.4
	6Н	17.1	17.8	17.6	18.2	18.5	17.6	18.2	18.0	18.6	19.0	19.0
	8Н	17.4	18.0	17.8	18.4	18.8	17.8	18.4	18.3	18.8	19.2	19.2
	12Н	17.6	18.1	18.0	18.5	18.9	18.0	18.5	18.4	18.9	19.4	19.4
8Н	4Н	16.8	17.4	17.2	17.8	18.2	17.2	17.8	17.6	18.2	18.6	18.6
	6Н	17.7	18.1	18.1	18.6	19.0	18.0	18.5	18.5	18.9	19.4	19.4
	8Н	18.0	18.5	18.5	18.9	19.4	18.4	18.8	18.8	19.2	19.7	19.7
	12Н	18.3	18.6	18.8	19.1	19.5	18.6	19.0	19.1	19.5	20.0	20.0
	4Н	16.8	17.4	17.3	17.8	18.2	17.2	17.8	17.7	18.2	18.6	18.6
	6Н	17.8	18.2	18.3	18.6	19.1	18.1	18.5	18.6	19.0	19.4	19.4
12Н	8Н	18.2	18.6	18.7	19.0	19.5	18.5	18.9	19.0	19.3	19.8	19.8
	12Н	18.2	18.6	18.7	19.0	19.5	18.5	18.9	19.0	19.3	19.8	19.8
Вариирование позиции наблюдателя для расстояний между светильниками S												
S = 1.0H		+0.2 / -0.3					+0.2 / -0.3					
S = 1.5H		+0.4 / -0.7					+0.4 / -0.6					
S = 2.0H		+0.8 / -1.0					+0.9 / -1.0					
стандартная таблица		BK05					BK05					
критическое сглаживание		0.2					0.8					
Скорректированные индексы экранирования, отнесенные к 3304lm Общий световой поток												
UGR-значения рассчитываются согласно CIE Publ. 117.												
Отношение расстояния к высоте = 0.25												

Рисунок 9.7 – Приклад таблиці значень UGR, що формується програмою DIALux

Крім числових значень, які можна вивести в звіт (рис.9.8), можна надати розрахунки UGR у вигляді растра, в якому розрахункові точки є положеннями спостерігача. Інформація може надаватися у вигляді кругових діаграм, в центрі яких зазначено максимальне значення (рис. 9.9).

Оценка затемнения/ослепления

Результат	Min	Max	Предельное значение
UGR	<10	11.6	19.0
Высота: 0.800 m			

Рисунок 9.8 – Межові значення UGR

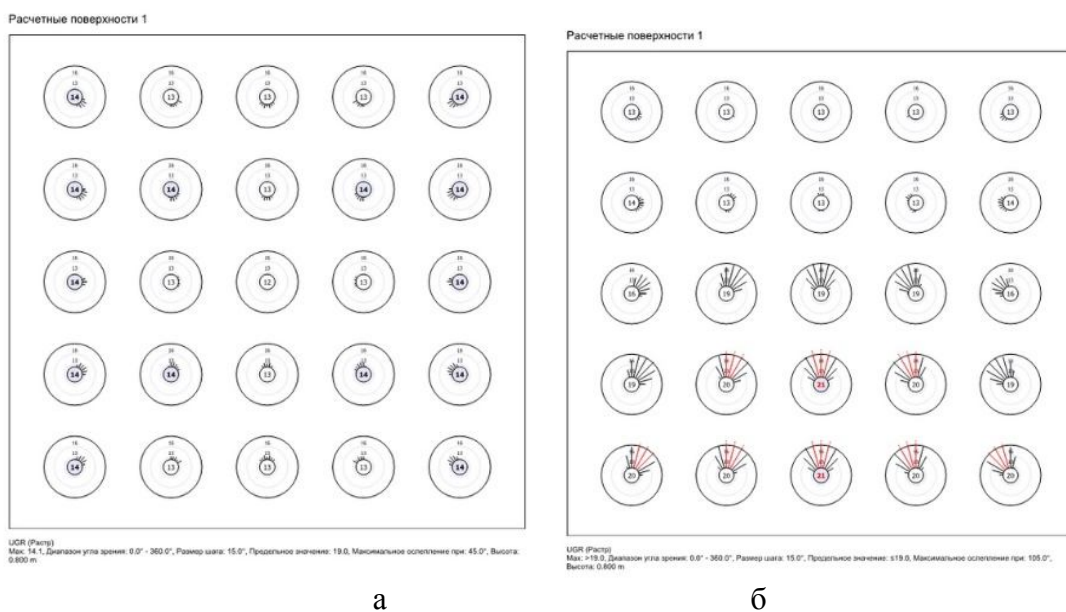


Рис. 9.9 – Приклади представлення значень UGR у вигляді кругових діаграм:
а – межове значення 19.0, максимальне засліплення при 45°,
б – межове значення ≤ 19.0 , максимальне засліплення при 105°

У даній роботі була досліджена залежність об'єднаного показника дискомфорту від способу розташування світильників. Моделювання освітлювальної установки проводилося в програмі DIALux. Точки зі спостерігачами були розміщені в довільному порядку по розрахунковій поверхні приміщення.

Розрахунок проводився для світильників з люмінесцентними лампами і для світильників зі світлодіодами. Для обох випадків були розглянуті три варіанти розташування світлових приладів в приміщенні: круговий, розміщення світловим полем і лінійне.

Результати моделювання наведені в таблицях 9.2 – 9.3.

Таблиця 9.1 – Максимальні значення UGR при розрахунку для світильників з люмінесцентними лампами

Розрахункова точка UGR	Максимальне значення UGR		
	Кругове	Поле	Лінійне
1	13	10	25
2	10	<10	21
3	<10	<10	20
4	<10	10	21
5	16	12	12
6	11	13	19
7	16	11	20
8	10	<10	13
9	10	<10	18
10	14	15	17
11	14	15	13
12	12	16	20
13	12	16	19
14	12	<10	18
15	10	<10	19
16	12	13	20
17	10	13	18

Таблиця 9.2 – Максимальні значення UGR при розрахунку для світильників зі світлодіодами

Розрахункова точка UGR	Максимальне значення UGR		
	Кругове	Поле	Лінійне
1	<10	11	22
2	<10	<10	18
3	<10	<10	18
4	<10	<10	17
5	14	11	13
6	10	<10	16
7	11	11	16
8	<10	<10	11
9	<10	10	14
10	11	<10	14
11	11	<10	11
12	<10	<10	17
13	<10	<10	15
14	<10	<10	16
15	<10	<10	15
16	10	<10	18
17	<10	<10	15

10 РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОСВІТЛЕНOSTІ

Підвищення вимог до якості освітлення привело до регламентації у приміщеннях циліндричної освітленості, що є характеристикою відчуття насиченості приміщення світлом.

Циліндрична освітленість, як і освітленість плоскої поверхні, може розглядатися у вигляді суми двох складових – прямої $(E_u)_{np}$ і відбитої $(E_u)_0$:

$$E_u = (E_u)_{np} + (E_u)_0. \quad (10.1)$$

Розглянемо способи розрахунку прямої складової циліндричної освітленості, запропоновані М. М. Гуторовим [3] для різних груп елементів, що світять.

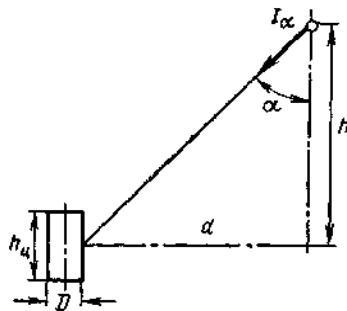


Рисунок 10.1 – До розрахунку циліндричної освітленості

Точкові елементи, що світять. Відповідно до визначення циліндричної освітленості як середньої щільності світлового потоку на бічній поверхні вертикально розташованого циліндра, розміри якого D і h_u прагнуть до нуля, математичний вираз для E_u (10.2):

$$E_u = \lim_{\substack{D \rightarrow 0 \\ h_u \rightarrow 0}} \frac{\Delta F}{S_u}. \quad (10.2)$$

де ΔF – світловий потік, що падає на бічну поверхню циліндра;

S_u – бічна поверхня циліндра.

Виразивши світловий потік, що падає на бічну поверхню циліндра, через вертикальну освітленість E_s і площу проекції бічної поверхні циліндра Dh_u (рис.10.1), рівняння (2) запишемо так:

$$\alpha = \arctg \frac{d}{h}; \quad E_u = \lim_{\substack{D \rightarrow 0 \\ h_u \rightarrow 0}} \frac{E_s Dh_u}{\pi Dh_u} = \frac{I_\alpha \cos 3\alpha}{h^2 \pi} \operatorname{tg} \alpha. \quad (10.3)$$

Для n точкових випромінювачів

$$E_u = \sum_{i=1}^n \frac{I_{\alpha} \cos 2\alpha}{h^2 \pi} \operatorname{tg} \alpha . \quad (10.4)$$

Введемо поняття *відносної циліндричної освітленості* ε_u , що відповідає значенню E_u при $h = 1 \text{ м}$

$$\varepsilon_u = \frac{I_{\alpha} \cos 2\alpha}{\pi} \operatorname{tg} \alpha . \quad (10.5)$$

За (10.5) будуються графіки відносної циліндричної освітленості для заданого світлорозподілу світильника, зображені на рисунку 10.2.

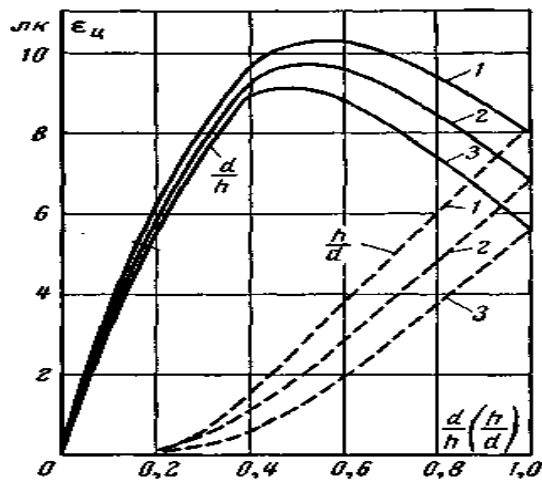


Рисунок 10.2 – Графіки відносної циліндричної освітленості

Циліндричну освітленість від сукупності n точкових випромінювачів, користуючись поняттям відносної циліндричної освітленості, можна знайти з рівняння

$$E_u = \frac{I_o F_l}{h^2 \cdot 10^5} \sum_1^n \varepsilon_u \quad (10.6)$$

де I_o – осьова сила світла світильника;

F_l – світловий потік ламп у світильнику.

Лінійні елементи, що світять. Розглянемо лінію, що світить, вісь якої перпендикулярна до утворюючого циліндра (рис. 10.3).

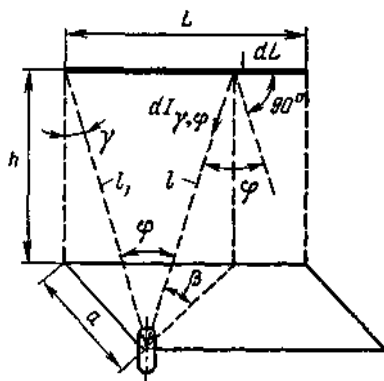


Рисунок 10.3 – до розрахунку циліндричної освітленості від світлової лінії

Виділимо елементарну ділянку лінії, що світить, довжиною d . Циліндрична освітленість, створювана ділянкою d у точці A розрахункової площини, визначиться як

$$dE_u = \frac{dI_{\gamma\varphi_i} \cos \beta_i}{\pi l_i^2} \quad (10.7)$$

З рисунку 10.3 отримуємо:

$$\begin{aligned} \cos \beta_i &= \sqrt{1 - \cos^2 \gamma \cos^2 \varphi_i}; \\ l_i &= \frac{l}{\cos \varphi_i}; \\ dL &= \frac{l_i}{\cos \varphi_i} d\varphi. \end{aligned} \quad (10.8)$$

Для світної лінії з косинусним світлорозподілом у поздовжній площині:

$$dI_{\gamma\varphi_i} = I_\gamma \cos \varphi_i dL \quad (10.9)$$

Підставивши (10.8) і (10.9) у вираз для циліндричної освітленості, створюваної елементом d (10.7), одержимо:

$$dE_u = \frac{I_\gamma}{\pi l} \cos \varphi_i \sqrt{1 - \cos^2 \gamma \cos^2 \varphi_i} d\varphi. \quad (10.10)$$

Циліндрична освітленість від усієї лінії визначиться інтегруванням (10.10) за довжиною лінії:

$$E_u = \frac{I_\gamma}{\pi l} \int_0^{\varphi_L} \cos \varphi_i \sqrt{1 - \cos^2 \gamma \cos^2 \varphi_i} d\varphi. \quad (10.11)$$

Після інтегрування одержимо:

$$E_y = \frac{I_\gamma}{\pi l} \left(\frac{1 - \cos^2 \gamma}{2 \cos \gamma} \ln \left[\frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \sin \varphi_L + \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma} \sin^2 \varphi_L + 1} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1 - \cos^2 \gamma}{8 \cos \gamma} \left(\left(\frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \sin \varphi_L + \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma} \sin^2 \varphi_L + 1} \right)^2 - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{\left(\frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \sin \varphi_L + \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma} \sin^2 \varphi_L + 1} \right)^2} \right) \right). \quad (10.12)$$

Спростимо. Вираз у дужках є функцією двох змінних кутів γ і φ_L . Тоді

$$E_y = \frac{l_\gamma}{l} f(\gamma, \varphi_L), \quad (10.13)$$

$$f(\gamma, \varphi_L) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1 - \cos^2 \gamma}{2 \cos \gamma} \ln \left[\frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \sin \varphi_L + \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma} \sin^2 \varphi_L + 1} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1 - \cos^2 \gamma}{8 \cos \gamma} \left(\left(\frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \sin \varphi_L + \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma} \sin^2 \varphi_L + 1} \right)^2 - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{\left(\frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \sin \varphi_L + \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma} \sin^2 \varphi_L + 1} \right)^2} \right) \right). \quad (10.14)$$

Для спрощення розрахунку будуються графіки. На осі ординат графіка відкладені значення функції $f(\gamma, \varphi_L)$, на осі абсцис – значення відносної довжини лінії, що світить, L/l ; криві графіка відповідають постійним значенням кута.

Відбита складової циліндричної освітленості. Відбита складової циліндричної освітленості в розрахунковій точці може розглядатися як сума двох доданків: циліндричної освітленості, що створюється стелею і ділянками стін, розташованими вище горизонтальної площини, яка проходить через розрахункову точку $(E_y)_\cup$, і циліндричної освітленості, що створюється підлогою та ділянками стін, розташованими нижче цієї площини, $(E_y)_\cap$:

$$(E_y)_0 = (E_y)_\cup + (E_y)_\cap. \quad (10.15)$$

Для визначення відбитої складової циліндричної освітленості від верхнього і нижнього півпросторів $(E_u)_\cup$ і $(E_u)_\cap$ необхідно попередньо розрахувати яскравості поверхонь, які обмежують освітлюване приміщення: L_n° , L_c , L_p , де L_n° – яскравість стелі без урахування прямого потоку світильників (за рахунок багаторазового відбиття).

Вважаємо, що розподіл яскравостей по поверхнях стелі, стін і підлоги рівномірним, що складаються відбитої складової циліндричної освітленості згідно з (10.15)

$$\begin{aligned} (E_u)_\cup &= L_n^\circ f(\theta_n) + L_c f'(\theta_c) \\ (E_u)_\cap &= L_p f(\theta_p) = L_c f''(\theta_c) \end{aligned} \quad , \quad (10.16)$$

де $f(\theta_n)$, $f(\theta_c)$, $f(\theta_p)$ – відповідно функції, обумовлені розмірами і положенням поверхонь стелі, стін і підлоги відносно розрахункової точки.

При визначенні відбитої складової циліндричної освітленості слід мати на увазі, що яскравість стелі повинна розраховуватися без урахування прямого світлового потоку світильником, що випромінюється у нижню півсферу і визначає пряму складову циліндричної освітленості.

Послідовність розрахунку циліндричної освітленості

1. Залежно від типу елемента, що світить, визначаємо пряму складову освітленості:

а) для точкового випромінювача – за рівнянням

$$E_u = \frac{I_0 F_n}{h^2 \cdot 10^5} \sum_1^n \varepsilon_u, \quad (10.17)$$

і графіків $\varepsilon_u = f\left(\frac{d}{h}\right)$ або $\varepsilon_u = f\left(\frac{h}{d}\right)$;

б) для лінійного випромінювача – за рівнянням

$$E_u = \frac{l_\gamma}{l} f(\gamma, \varphi_L), \quad (10.18)$$

і графіків $\varepsilon_u = f\left(\frac{d}{h}\right)$ або $\varepsilon_u = f\left(\frac{h}{d}\right)$;

в) для рівнояскравої поверхні – за рівнянням

$$E_u = L \left(\frac{2\theta_D - \sin 2\theta_D}{2} \right) = Lf(\theta) \quad (10.19)$$

або таблиці $\varepsilon_u = f\left(\frac{b}{h}\right)$.

2. Визначаємо значення середньої яскравості стелі L_n° (без урахування прямого потоку світильників), стін L_c і підлоги L_p за попередньо знайденими сталими світлових потоків F_n° , F_c і F_p .

3. Будуємо розрахункові сітки для визначення функцій $f(\theta_n)$ і $f(\theta_p)$.

4. Визначаємо функції $f(\theta_n)$, $f(\theta'_c)$, $f(\theta_p)$ і $f(\theta''_c)$.

5. Розраховуємо відбиту складову циліндричної освітленості від верхнього $(E_u)_\cup$ і нижнього $(E_u)_\cap$ півпросторів. Визначаємо загальну циліндричну освітленість:

$$E_u = (E_u)_{np} + (E_u)_\cup + (E_u)_\cap. \quad (10.20)$$

З огляду на важкість роздільного розрахунку прямої та відбитої складової циліндричної освітленості були розроблені комп'ютерні програми, що визначають й циліндричну освітленість. Однією з таких програм є програма DIALux, в якій достатньо додати розрахункову точку з відповідними координатами, і у звіті програми можна отримати значення цієї якісної характеристики освітлювальної установки.

11 ПУЛЬСАЦІЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Світловий потік газорозрядних джерел світла при живленні струмом промислової частоти пульсує з частотою 100 Гц. Причиною цього є інерційність газового розряду. Якісний критерій – пульсація яскравості робочої поверхні у часі (рис 11.1).

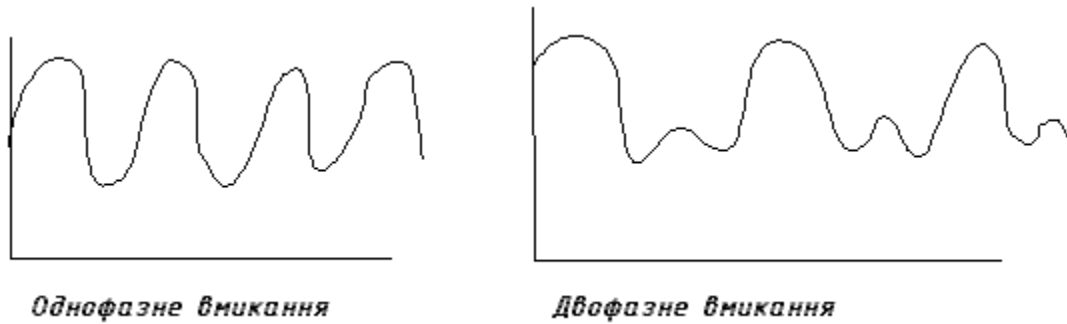


Рисунок 11.1 – Пульсація яскравості для різних схем вмикання

Для кількісної оцінки частоти пульсації газорозрядних джерел світла користуються поняттям коефіцієнта пульсації.

$$K_n = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{cp}} 100, \quad (11.1)$$

де E_{\max} , E_{\min} – максимальне і мінімальне значення освітленості в часі при постійному рівні E_{cp} ;

E_{cp} – середнє значення освітленості за повний період часу $\tau = 0,02$ с.

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt. \quad (11.2)$$

Для зменшення пульсації прийнято користуватися наступними методами:

- 1) включення суміжних ламп у різні фази електричної мережі;
- 2) живлення установок струмом підвищеної частоти;
- 3) застосування дволампових світильників з ємнісним та індуктивним баластом.

Зменшення коефіцієнта пульсації світлового потоку необхідно для підвищення якості освітлення, зниження зорового стомлення і підвищення продуктивності праці. Зменшення коефіцієнта пульсації з 50–55 до 5, що відповідає включенню люмінесцентних ламп на одну або три фази змінного струму з частотою 50 Гц, приводить до істотного підвищення зорової працездатності й зменшення зорової втоми. З огляду на істотний вплив глибини пульсації освітленості робочих місць на зорове стомлення і продуктивність праці нормами штучного освітлення регламентуються максимально припустимі значення коефіцієнта пульсації світлового потоку на робочій поверхні.

12 СВІЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

12.1 Загальні положення розрахунку

Завданням світлотехнічного розрахунку освітлювальної установки, параметри якої були знайдені у попередніх стадіях проєктування, може бути визначення встановленої потужності джерел світла за заданим рівнем освітленості, або визначення за заданим розміщенням світильників і відомій потужності джерел світла освітленості на розрахунковій площині й розподілу яскравості в полі зору.

Вирішення як першої, так і другої задач, прямий і перевірочний розрахунок вимагають як розрахунку розподілу світлових потоків, що безпосередньо падають від світильників на розрахункову площину, стелю і стіни, так і розрахунку багаторазового відбиття цих потоків між поверхнями, що обмежують освітлюване приміщення.

Сумарна освітленість у заданій точці розрахункової площини

$$E_p = (E_p)_{np} + (E_p)_{отр}, \quad (12.1)$$

де $(E_p)_{np}$ – пряма складової освітленості;

$(E_p)_{отр}$ – відбита складової освітленості.

Розподіл відбитої складової освітленості є практично рівномірним, розподіл прямої складової освітленості є істотно нерівномірним, залежить від світлорозподілу і від розміщення світильників в освітлюваному просторі.

Тому середнє значення сумарної освітленості не завжди може бути критерієм для визначення необхідної потужності джерел світла, а також служити кількісною характеристикою умов освітлення.

Винятком є випадок, коли обидві складової освітленості, пряма і відбита, розподілені практично рівномірно. У цьому наразі для розрахунку середньої освітленості прийнято користуватися поняттям коефіцієнта використання світлового потоку освітлювальної установки, під яким розуміється відношення світлового потоку, що встановився на розрахунковій площині, F_p до сумарного світлового потоку джерел світла:

$$u_{o.y.} = F_p / (nF_{\lambda}), \quad (12.2)$$

де F_{λ} – світловий потік джерела світла, лм,

n – число джерел світла.

Величина $u_{o.y.}$ залежить від світлорозподілу і розміщення світильників у приміщенні, ККД. світильників, співвідношення розмірів приміщення і властивостей відбиваючих поверхонь, що обмежують приміщення.

(застосування світильників з концентрованим світлорозподілом приводить до збільшення коефіцієнта використання освітлювальної установки $u_{o,y}$).

Вплив світлорозподілу і розміщення світильників на коефіцієнт використання освітлювальної установки у меншій мірі позначається в приміщеннях зі світлою обробкою. Але $u_{o,y}$ зростатиме зі збільшенням частки світлового потоку, що безпосередньо падає на розрахункову площину.

Вплив ККД світильників на коефіцієнт використання освітлювальної установки визначається тим, що величина ККД залежить від втрат світлового потоку джерел світла в світильнику. Тому можна вважати, що між коефіцієнтом використання освітлювальної установки і ККД світильника існує пряма залежність(рис 11.1).

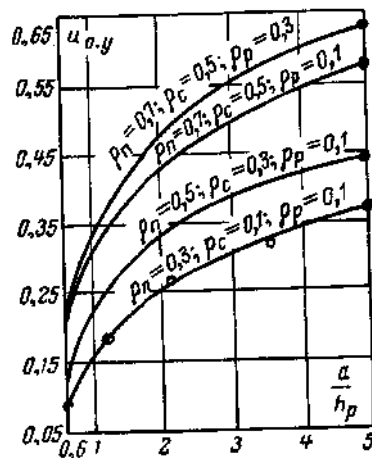


Рисунок 11.1 – Залежність коефіцієнту використання освітлювальної установки від геометричних розмірів і розташування світильників в приміщенні:

a – сторона квадратного приміщення ; h_p – висота підвісу світильника над розрахунковою площиною; ρ_n – коефіцієнт відбиття стелі; ρ_c – коефіцієнт відбиття стін ; ρ_p – коефіцієнт відбиття розрахункової площини.

Середня освітленість розрахункової площини:

$$E_{cp} = \frac{F_p}{S_p k} = \frac{n F_{\lambda} u_{oy}}{S_p k}, \quad (12.3)$$

де F_p – сумарний світловий потік, що падає на розрахункову площину,

S_p – розрахункова площа,

k – коефіцієнт запасу, що враховує зниження світлового потоку освітлювальної установки в процесі експлуатації.

Визначення світлового потоку, що забезпечує на розрахунковій площині задану середню освітленість

$$n F_{\lambda} = \frac{E_{cp} S_p k}{u_{oy}}. \quad (12.4)$$

У тих випадках, коли умова рівномірності розподілу прямої складової освітленості не дотримується або коли необхідно проаналізувати фактичний розподіл освітленості на розрахунковій площині, виникає необхідність роздільного розрахунку освітленості, створюваної світловим потоком, що безпосередньо падає від світильників на розрахункову площину, і освітленості, створюваної світловим потоком, що падає на розрахункову площину в результаті багаторазового відбиття.

Для розрахунку прямої складової освітленості використовують у подібних випадках різні методи залежно від типу світильників та їхнього розміщення в освітлюваному просторі. Що стосується відбитої складової освітленості, то, вважаючи її розподіленою рівномірно на розрахунковій площині, можна застосувати метод коефіцієнта використання:

$$(E_p)_o = \frac{nF_l(u_{oy})_o}{S_p k}, \quad (12.5)$$

$$(u_{oy}) = \frac{(F_p)_o}{nF_l}, \quad (12.6)$$

де $(F_p)_o$ – світловий потік, що впав на розрахункову площину в результаті багаторазового відбиття;

nF_l – сумарний потік джерел світла.

Вираз для сумарної освітленості елемента поверхні в будь-якій заданій точці розрахункової площини

$$E_p = (E_p)_{np} + \frac{nF_l(u_{oy})_o}{S_p k}, \quad (12.7)$$

де $(E_p)_{np}$ – пряма складова освітленості;

F_l – світловий потік джерела світла;

n – число джерел світла;

$(u_{oy})_o$ – відбита складова коефіцієнта використання освітлювальної установки;

S_p – площа розрахункової площини;

K – коефіцієнт запасу.

12.2 Класифікація світних елементів

Світні (випромінюючі) елементи залежно від співвідношення їхніх розмірів і відстаней до освітлюваної поверхні можна розбити на три групи: точкові, лінійні й поверхні кінцевих розмірів. До першої групи світних

елементів відносяться освітлювальні прилади з лампами розжарювання й газорозрядними лампами, розташовані на відстанях L до освітлюваної поверхні, що перевищують у 5 разів і більше розміри приладів D . Це дозволяє наділяти такі світні елементи, властивостями точкових і характеризувати світлорозподіл кривими сили світла (рис 11.2, а).

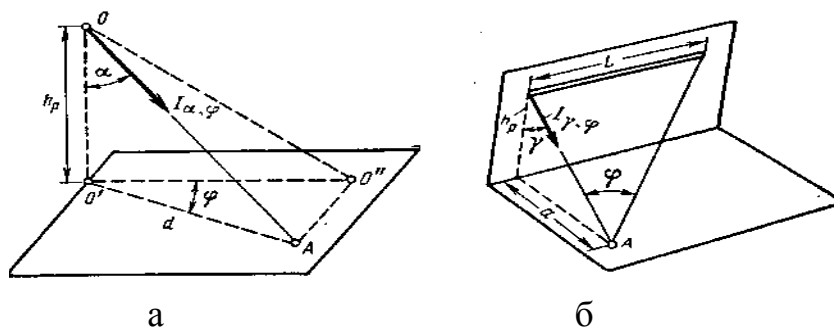


Рисунок 11.2 – Визначення кутів спостереження з розрахункової точки

Положення освітлювального приладу щодо обраної розрахункової точки в загальному випадку визначається координатами h_p , φ і α ,

де h_p – висота підвісу освітлювального приладу над освітлюваною поверхнею,

i – кути, що визначають напрямок сили світла в розрахункову точку.

Положення симетричного освітлювального приладу, світлорозподіл якого характеризується однією й тією ж кривою сили світла в будь-якій поздовжній площині, буде визначатися двома координатами: h_p і α , де α – кут між напрямком сили світла і віссю симетрії освітлювального приладу.

При розташуванні освітлювального приладу на невеликій відстані від освітлюваної поверхні у порівнянні з розміром освітлювального приладу останній не може розглядатися як точковий випромінювач і його світлорозподіл слід характеризувати не кривою сили світла, а кривими рівної освітленості розрахункової площини.

Положення світильника місцевого освітлення щодо розрахункової точки буде визначатися координатами h_p і d , де d – відстань від проекції осі світильника на освітлювану поверхню до розрахункової точки.

Друга група елементів, що світять: світильники з люмінесцентними лампами, розташовані звичайно безперервними лініями або лініями з розривами, а також світні панелі, довжина яких може бути порівняна з відстанню до освітлюваної поверхні.

Світлорозподіл лінійних елементів, що світять, характеризується кривими сил світла в поздовжній і поперечній площинах, віднесених до одиничної довжини лінії, що світить. Положення лінії, що світить, щодо точки розрахунку визначається висотою підвісу h_p і двома кутами: кутом γ у поперечній площині, перпендикулярній до осі лампи і прямою, що проходить через точку

розрахунку, і кутом φ , під яким видна лінія, що світить, з точки розрахунку в поздовжній площині (рис. 11.2, б).

Третя група – поверхні, що світять, являють собою або установки відбитого світла, або стелі, що світять, або панелі, перекриті глушеним склом, пластмасою або ґратчастими розсіювачами, поверхня яких має розміри, що можуть бути порівняні з відстанню до освітлюваної поверхні.

Світлорозподіл цієї групи елементів, що світять, прийнято характеризувати розподілом яскравості в просторі і на поверхні, що світить. Поверхні, що світять, в установках відбитого світла є дифузно відбиваючими поверхнями, яскравість яких в усіх напрямках простору практично однакова.

Панелі, що світять, перекриті просвітчастим матеріалом з об'ємним розсіюванням, також можуть бути віднесені до рівнояскравих поверхонь. Виняток – панелі, перекриті ґратчастими затемнювачами, рівномірність розподілу яскравості у просторі в яких порушується. Розподіл яскравості на стелі, що світить, або окремих його зонах можна вважати рівномірним, тому що звичайно ця умова є вихідною при проектуванні подібних установок.

Характер світних елементів проектованої освітлювальної установки визначає вибір методики розрахунку прямої складової освітленості. Оскільки класифікація елементів, що світять, визначається відстанню, на якій оцінюється їхня дія, той самий елемент, що світить, залежно від умов його застосування, може бути віднесений до різних груп.

З похибкою у межах 5 %, світильник з люмінесцентною лампою можна прийняти за точковий елемент, що світить, якщо довжина його в 2 рази перевищує відстань до розрахункової точки. Рівнояскравий диск, що світить, може бути віднесений до групи точкових джерел, якщо відстань від центра диска до розрахункової точки перевищує в 2,5 рази його діаметр.

13 РОЗРАХУНОК ПРЯМОЇ СКЛАДОВОЇ ОСВІТЛЕНOSTІ

13.1 Розрахунок освітленості від точкових світних елементів із симетричним світлорозподілом

Розглянемо загальний випадок розрахунку освітленості від світильника із симетричним світлорозподілом, обумовленим відомою залежністю $I_\alpha = I(a)$.

Нехай на деякій відстані l від світильника, що значно перевищує його розміри, розташована освітлювана поверхня S . Виділимо елемент поверхні у точці A , орієнтація якого в просторі визначається нормаллю n , і проведемо площину Q , дотичну до розглянутого елемента d у точці A . Через точку A проведемо також площину P , перпендикулярну до OO' , рис 12.1.

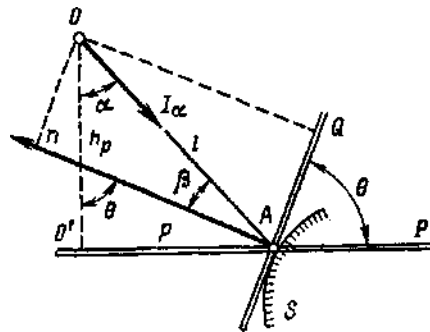


Рисунок 12.1 – До розрахунку прямої освітленості від точкового джерела

Освітленість елемента поверхні d згідно із законом квадрата відстані визначається

$$E_A = \frac{I_a}{l^2} \cos \beta \quad (13.1)$$

де I_a – сила світла світильника в напрямку до точки A ;

β – кут між напрямком сили світла в точку A й нормаллю до елемента d ;

l – відстань від світильника до елемента поверхні.

$$\cos \beta = \frac{OO''}{l} : \quad (13.2)$$

$$OO'' = \left(h_p - \frac{P}{\tan \theta}\right) \cos \theta \pm \frac{P}{\sin \theta} ; \quad (13.3)$$

де $\theta > \frac{\pi}{2} + \alpha$.

Перетворивши цей вираз, одержимо: $OO'' = h_p \cos \theta \pm p \sin \theta$:

$$\cos \beta = \frac{h_p \cos \theta \pm p \sin \theta}{l}. \quad (13.4)$$

Підставивши цей вираз в (12.1), маємо:

$$E_A = \frac{I_a}{l^3} (h_p \cos \theta \pm p \sin \theta). \quad (13.5)$$

Тому що $l = h_p / \cos \alpha$, то

$$E_A = \frac{I_a \cos^3 \alpha}{h_p^2} (\cos \theta \pm \frac{P}{h_p} \sin \theta), \quad (13.6)$$

де θ – кут нахилу розрахункової площини відносно площини, перпендикулярній до осі симетрії світильника;

α – кут між напрямком сили світла до розрахункової точки і віссю симетрії світильника;

h_p – висота підвісу світильника над горизонтальною площиною, що проходить через розрахункову точку;

p – найкоротша відстань від проекції вісі симетрії світильника на горизонтальну площину до сліду перетину останньої з розрахунковою площиною.

Рівняння (12.6) дозволяє безпосередньо розрахувати освітленість площини, довільно орієнтованої в просторі. Для спрощення розрахунків користуються графіком залежності

$$\cos \theta \pm \frac{P}{h_p} \sin \theta = f\left(\frac{P}{h_p}\right) \text{ для постійних } \theta.$$

У практиці проектування освітлювальних установок випадок розрахунку освітленості похилої площини зустрічається порівняно мало. Частіше виникає необхідність розрахунку освітленості або на площині, перпендикулярній до осі симетрії світильника, або на площині, рівнобіжній їй.

Розглянемо випадок, коли вісь симетрії світильника перпендикулярна до освітлюваної площини Q . Оскільки в практичних умовах світильники звичайно розміщуються так, що їхня вісь симетрії розташована вертикально, розрахункова площина буде горизонтальною площиною (рис. 12.2).

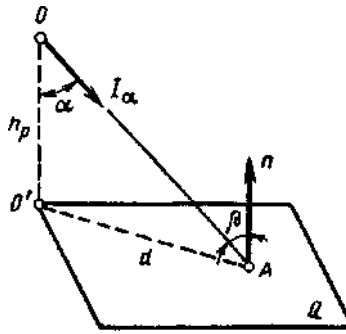


Рисунок 12.2 – Вісь симетрії світильника перпендикулярна до освітлюваної площини Q

$$\theta = 0, \quad E_e = \frac{I_a}{h_p^2} \cos^3 \alpha, \quad (13.7)$$

де E_e – освітленість елемента поверхні горизонтальної площини в точці.

Зіставляючи (12.6) і (12.7), бачимо, що освітленість похилої площини може бути виражена через освітленість горизонтальної площини:

$$E_A = E_e \left(\cos \theta \pm \frac{P}{h_p} \sin \theta \right) \quad (13.8)$$

Якщо вісь симетрії рівнобіжна розрахунковій площині, $\theta = \pi/2$, то

$$E_B = \frac{I_a \cos^3 \alpha}{h_p^2} \cdot \frac{P}{h_p} = E_e \frac{P}{h_p}, \quad (13.9)$$

де E_e – освітленість елемента поверхні вертикальної площини в точці A ;

p – відстань від проекції осі симетрії світильника на горизонтальну площину, що проходить через точку розрахунку, до сліду перетину площин.

Рівняння (12.8) і (12.9) дозволяють сформулювати загальне правило, справедливе для будь-якого точкового джерела: відношення значень освітленості двох площин в одній і тій самій точці дорівнює відношенню довжин перпендикулярів, що опущені на ці площини з точки розташування джерела світла.

Послідовність операцій при розрахунку освітленості від симетричних елементів, що світять, зводиться до наступного:

1. Визначають тангенс кута падіння світлового променя в розрахункову точку:

$$\operatorname{tg} \alpha = d/h_p, \quad (13.10)$$

де d – відстань від розрахункової точки до проекції осі симетрії світильника на площину, перпендикулярну їй і ту, що проходить через розрахункову точку.

2. За знайденим тангенсом визначають кут α і $\cos^3 \alpha$
3. За кривою сили світла заданого світильника знаходять силу світла I_α для знайденого кута α .
4. Підраховують освітленість горизонтальної, вертикальної або похилої площин.

При великій кількості світильників розрахунок трудомісткий. Для цього застосовують різні спрощені методики.

Елементарні криві освітленості. При необхідності розрахунку освітленості в ряді точок освітлюваної поверхні від великого числа світильників загального освітлення висота підвісу яких однакова, зручно користуватися елементарними кривими освітленості $E = f(d)$ для заданого типу світильника ($h_p = \text{const}$).

13.2 Розрахунок освітленості від несиметричних світильників

Нехай у точці O розташований світильник з несиметричним світлорозподілом, причому його вісь OO' перпендикулярна до розрахункової площини Q , (рис 12.3).

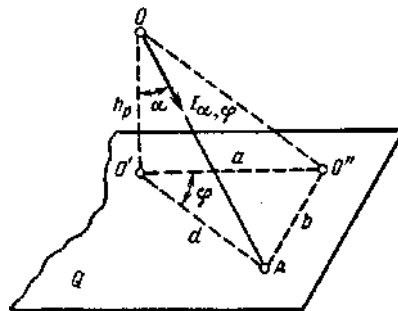


Рисунок 12.3 – До розрахунку освітленості світильника з несиметричним світлорозподілом з віссю, яка перпендикулярна до розрахункової площини Q

Положення розрахункової точки A відносно елемента, що світить, буде визначатися висотою h_p , кутом α і кутом φ , що відлічуються від площини симетрії світильника $OO'O''$:

$$\alpha = \arctg \frac{d}{h_p}; \quad (13.11)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a}. \quad (13.12)$$

Знайдені значення кутів α і φ дозволяють, користуючись кривими рівних значень сили світла, знайти значення сили світла в напрямку до розрахункової точки, і розрахувати освітленість елемента поверхні в цій точці:

$$E_{\varepsilon} = \frac{I_{\alpha\varphi} \cos^3 \alpha}{h_p^2}, \quad (13.13)$$

де $I_{\alpha\varphi}$ – сила світла в напрямку до розрахункової точки;

α – кут між напрямком сили світла в розрахункову точку і віссю світильника $00'$.

14 РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЕНOSTІ ВІД ЛІНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО СВІТЯТЬ, РОЗТАШОВАНИХ У ЛІНІЮ З РОЗРИВАМИ

На рисунках 14.1 і 14.2 зображені світна лінія з розривами і криві розподілу освітленості уздовж осі лінії, що світить, відповідно.

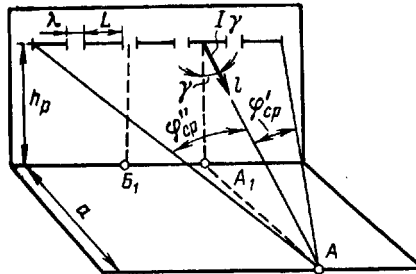


Рисунок 14.1 – Світна лінія з розривами

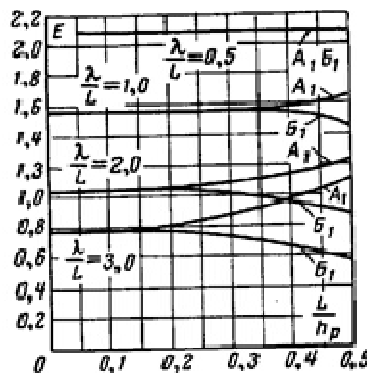


Рисунок 14.2 – Криві розподілу освітленості

Світильники з люмінесцентними лампами часто утворюють ряди або лінію з розривами. Коли відношення відстані між торцями світильників λ до висоти їхнього підвісу над розрахунковою площиною λ/h_p стає великим, порушується рівномірність розподілу освітленості уздовж ряду за рахунок відносної зміни освітленості в точках, розташованої під світильником (A_1) і під інтервалом між найближчими світильниками (B_1).

Аналіз для ліній, що світять, з косинусним світлорозподілом у поздовжній площині показує, що ступінь нерівномірності розподілу освітленості уздовж ряду залежить від відносної довжини елемента, що світить, L/h_p і відношення λ/L . Як впливає з рисунку 14.2, для всіх значень λ/L рівномірність розподілу освітленості уздовж ряду не порушується за умови $((L+\lambda)/h_p) \leq 0.7$, що дає змогу розглядати таку лінію з розривами як безперервну лінію, що світить (сила світла з одиниці довжини I'_j) :

$$I'_j = I_j \frac{L}{L + \lambda}, \quad (14.1)$$

де I_j – сила світла з одиниці довжини елемента, що світить;

L – довжина елемента, що світить;
 λ – інтервал між елементами, що світять.

Для встановлення практично припустимих значень λ , Г. М. Кнорринг побудував криву рівних значень нерівномірності освітлення $\frac{\Delta E}{2E_{cp}} = 5\%$ у координатах L/h_p і λ/h_p .

Для реальних розмірів світильників з люмінесцентними лампами ($L \leq 1,5$ м) значення L/h_p звичайно не перевищують 0,5. Допускаючи припустимою нерівномірність розподілу освітленості уздовж ряду 5 %, що світить лінію з розривами, можна розглядати як суцільну, якщо розриви між світильниками не перевищують половини h_p (рис. 14.3).

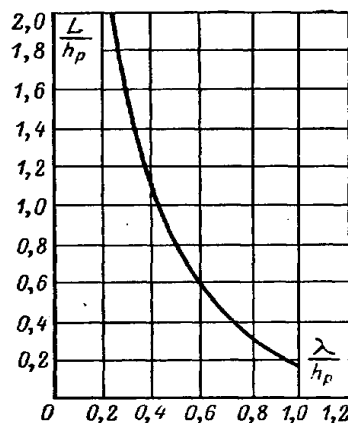


Рисунок 14.3 – Крива рівних значень нерівномірності освітлення

На рис.14.3 зображено криву рівних значень нерівномірності освітлення $\frac{\Delta E}{2E_{cp}} = 5\%$ в координатах L/h_p і λ/h_p .

Освітленість від такої лінії, що світить:

$$E = \frac{I'_j}{2h_p} \cos^2 j f(\varphi) = \frac{I_j L}{2h_p(L + \lambda)} \cos^2 j f(\varphi), \quad (14.2)$$

де $f(\varphi)$ – функція, що залежить від розміру і положення лінії, що світить, відносно розрахункової точки при $n = 1$.

Максимальне значення функції $f(\varphi)$ для косинусного світлорозподілу в поздовжній площині ($n = 1$) дорівнює $\pi/2$ і, отже, рівняння для визначення освітленості від нескінченно протяжної лінії, розташованої в одну сторону від розрахункової точки:

$$E_{\infty} = [\pi I_j L / 4h_p (L + \lambda)] \cos^2 j, \quad (14.3)$$

де I_j – сила світла з одиниці довжини лінії, що світить.

Послідовність розрахунку освітленості від лінії з розривами, така ж, що і при розрахунку освітленості від одиночної лінії, що світить.

15 РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ БАГАТОРАЗОВИХ ВІДБИТТІВ

У практиці освітлювальної техніки освітлюваний об'єм приміщення обмежується поверхнями, що відбивають значну частину світлового потоку, який падає на них від світильників і джерел світла. В установках внутрішнього освітлення відбиваючими поверхнями є підлога, стеля, обладнання та ін.

У тих випадках, коли поверхні, що обмежують простір, мають високі коефіцієнти відбиття, відбита складова освітленості може мати велике значення і їх врахування необхідне. Будь-яке приміщення можна розглядати як деякий простір, обмежений стелею, стінами і розрахунковою площиною, що утворюють правильний паралелепіпед (розрахункова площа може збігатися з площиною підлоги).

Світловий потік елементів, що світять, розташованих усередині розглянутого приміщення, розподіляється рівномірно між всіма поверхнями:

- 1) світловий потік елементів, що світять, який безпосередньо падає на стелю F_n ;
- 2) світловий потік, який безпосередньо падає на стіни F_c ;
- 3) світловий потік, який падає безпосередньо на розрахункову площину F_p .

Оскільки всі поверхні, що обмежують освітлюваний простір, мають певні відбиваючі властивості, то світлові потоки, що безпосередньо упали на ці поверхні, будуть частково відбиватися від них і після перерозподілу знову падати на ці поверхні. У результаті встановлюється світловий потік, який визначає їх яскравість і освітленість.

Цей світловий потік розглядається як той, що складається з потоку, який безпосередньо упав від світних елементів і суми потоків, які додатково потрапили на цю поверхню з усіх інших поверхонь, що мають визначену яскравість (світність) і, отже, поряд з елементами, що світять, можуть розглядатися як вторинні випромінювачі (рис 15.1).

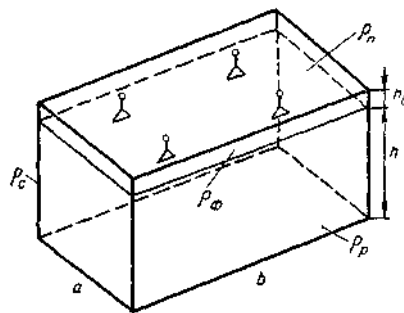


Рисунок 15.1 – До розрахунку багаторазового відбиття світлового потоку системи освітлення

Можна скласти рівняння, спільне розв'язання яких дозволить знайти світлові потоки кожної поверхні, якщо відомо F_i :

$$F_i = F_i' + \sum_{k=1}^6 F_k \rho_k u_{ki} . \quad (15.1)$$

де F_i' – світловий потік світних елементів, який безпосередньо падає на розглянуту поверхню;

F_k – світловий потік, який встановився в результаті багаторазових відбиттів на кожній з інших п'яти поверхонь;

ρ_k – коефіцієнт відбиття k -ї поверхні;

u_{ki} – коефіцієнт використання світлового потоку, що визначає частку світлового потоку k -ї поверхні, який падає на i -ю поверхню.

Допущення:

1) середня щільність первинного світлового потоку, що безпосередньо падає від світних елементів на кожну з поверхонь, що утворюють стіни приміщення, через симетрію їхнього розташування відносно світних елементів практично однакова;

2) коефіцієнти відбиття стін незначно розрізняються, можна з деяким наближенням розглядати стіни як єдину складну поверхню, що відбиває, із середньою світністю.

Після прийняття цих допущень маємо три рівняння:

Допущення 2 призводить до додаткових утрат світлового потоку, що компенсуються коефіцієнтом багаторазових відображень:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \rho(1 - u)} ; \quad (15.2)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття поверхні;

u – коефіцієнт використання світлового потоку поверхні, що відбиває, відносно вихідного отвору:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \rho_c(1 - u_{c,n} - u_{c,p})} . \quad (15.3)$$

3) замінимо увігнуту поверхню, утворену ділянками стін, розташованими над площиною, що проходить через світлові центри світильників, і площиною стелі, фіктивною плоскою поверхнею, що має такі ж відбиваючі властивості (15.1).

Світловий потік, який вийшов через фіктивну площину $(F_\phi)_p$, може бути виражений через світловий потік, випромінюваний світильниками у верхню півсферу, F_\cap :

$$(F_\phi)_p = F_\cap \gamma_\phi \rho_{cp} u_\phi , \quad (15.4)$$

де γ_ϕ – коефіцієнт багаторазових відбиттів увігнутої поверхні, утвореної стелею і верхніми ділянками стін;

ρ_{cp} – середньозважений (за площею) коефіцієнт відбиття розглянутої поверхні;

u_ϕ – коефіцієнт використання світлового потоку розглянутої поверхні щодо вихідного отвору.

$$\rho_\phi = \frac{\rho_{cp} u_\phi}{1 - \rho_{cp} (1 - u_\phi)} \quad (15.5)$$

Коефіцієнт відбиття фіктивної площини. Значення коефіцієнта використання світлового потоку увігнутої поверхні, утвореної стелею і верхніми ділянками стін відносно вихідного отвору визначиться відношенням площі вихідного отвору S_ϕ , чисельно рівної площі стелі, до площі поверхні, що відбиває, S_0 , рівної сумарній площі стелі і верхніх ділянок стін:

$$u_\phi = \frac{ab}{ab + 2\eta_0(a + b)}, \quad (15.6)$$

де a, b – ширина і довжина освітлюваного приміщення;

h_0 – відстань від світильників до стелі.

4) прийняті допущення дозволяють розглядати освітлюване приміщення у вигляді паралелепіпеда, обмеженого зверху фіктивною площиною, що проходить через світлові центри світильників, а знизу розрахунковою площиною, що в окремому випадку може бути підлогою приміщення.

Світлові потоки, який встановилися на кожній з поверхонь такого паралелепіпеда, з урахуванням припущень можуть бути представлені як

$$\left. \begin{aligned} F_\phi &= F'_\phi + F_c \rho_c u_{c,\phi} + F_p \rho_p u_{p,\phi}; \\ F_c &= \gamma_c (F'_c + F_\phi \rho_\phi u_{\phi,c} + F_p \rho_p u_{p,c}); \\ F_p &= F'_p + F_\phi \rho_\phi u_{\phi,p} + F_c \rho_c u_{c,p}, \end{aligned} \right\} \quad (15.7)$$

де F'_ϕ, F'_c, F'_p – світлові потоки світильників, що безпосередньо падають на фіктивну площину, стіни і розрахункову площину;

F_ϕ, F_c, F_p – світлові потоки, який встановилися на цих поверхнях у результаті багаторазового відбиття;

$\rho_\phi, \rho_c, \rho_p$ – коефіцієнти відбиття поверхонь, що обмежують розглянутий обсяг;

γ – коефіцієнт багаторазового відбиття стін;

$u_{c,\phi}, \dots, u_{c,p}$ – коефіцієнти використання світлового потоку однієї поверхні, що відбиває, щодо іншої (коефіцієнти зв'язку).

Перенесемо вільні члени в ліву частину:

$$\left. \begin{aligned} F'_\phi &= F_\phi - F_c \rho_c u_{c\phi} - F_p \rho_p u_{p\phi}; \\ \gamma_c F'_c &= -\gamma_c F_\phi \rho_\phi u_\phi + F_c - \gamma_c F_c \rho_p u_{pc}; \\ F'_p &= -F_\phi \rho_\phi u_{\phi p} - F_c \rho_c u_{cp} + F_p. \end{aligned} \right\}; \quad (15.7a)$$

$$D = \left\{ \begin{aligned} &+1 - \rho_c u_{c\phi} - \rho_p u_{p\phi} \\ &-\gamma_c \rho_\phi u_\phi + 1 - \gamma_c \rho_p u_{pc} \\ &-\rho_\phi u_{\phi p} - \rho_c u_{cp} + 1 \end{aligned} \right\};$$

$$F_p = \left\{ \begin{aligned} &+1 - \rho_c u_{c\phi} F'_\phi \\ &-\gamma_c \rho_\phi u_{\phi c} + 1 \gamma_c F'_c \\ &-\rho_\phi u_{\phi p} - \rho_c u_{cp} F'_p \end{aligned} \right\};$$

$$\begin{aligned} D &= 1 - [\gamma_c \rho_\phi \rho_c \rho_p (u_{c\phi} u_{pc} u_{\phi p} + u_{p\phi} u_{\phi c} u_{c.p}) + \rho_\phi (\rho_p u_{p\phi} u_{\phi p} + \gamma_c \rho_c u_{\phi c} u_{c\phi}) + \gamma_c \rho_c \rho_p u_{pc} u_{c.p}], \\ F_p &= (F'_\phi \rho_\phi [\gamma_c u_{\phi c} \rho_p u_{cp} + u_{\phi p} + F'_c \rho_c \gamma_c (\rho_\phi u_{c\phi} u_{\phi p} + u_{c\phi}) + F'_p (1 - \gamma_c \rho_c \rho_\phi u_{\phi c} u_{c\phi})] / D. \end{aligned} \quad (15.8)$$

Для спрощення рівняння (15.8) замінимо всі коефіцієнти використання світлового потоку однієї поверхні, що відбиває, відносно іншої через коефіцієнт використання світлового потоку фіктивної площини відносно розрахункової площини $u_{\phi p}$, що легко може бути визначений за графіком.

Унаслідок симетрії розташування фіктивної площини і розрахункової площини відносно стін маємо:

$$\left. \begin{aligned} u_{\phi.c} &= 1 - u_{\phi.p}; \\ u_{\phi.p} &= u_{p.\phi}; \\ u_{c.\phi} &= u_{c.p} \end{aligned} \right\} \quad (15.9)$$

1. Коефіцієнт використання $u_{c.p}$ через коефіцієнт використання світлових потоків, що падають з фіктивної площини на стіни $F_{\phi.c}$ і зі стін на фіктивну площину $F_{c.\phi}$:

$$\begin{aligned} F_{\phi.c} &= R_\phi S_\phi u_{\phi.c}; \\ F_{c.\phi} &= R_c S_c u_{c.\phi}. \end{aligned} \quad (15.10)$$

де R_c – світність стін;

R_ϕ – світність фіктивної площини.

Відповідно до теореми взаємності при рівності світності фіктивної площини R_ϕ і світності стін світлові потоки $F_{c.\phi}$ і $F_{\phi.c}$ будуть рівні. Тоді одержимо

$$\begin{aligned} u_{c.\phi} &= u_{\phi.c} \frac{S_\phi}{S_c}; \\ S_\phi u_{\phi.c} &= S_c u_{c.\phi} \end{aligned} \quad (15.11)$$

Відношення площі фіктивної площини S_ϕ до площі стін для прямокутного приміщення $a \times b$:

$$\frac{S_\phi}{S_c} = \frac{ab}{2h(a+b)} = \frac{\varphi}{2}, \quad (15.12)$$

де φ – індекс приміщення;

$$u_{c.\phi} = (1 - u_{\phi.p}) \frac{\varphi}{2} \quad (15.13)$$

Підставивши (15.8) в (15.13) отримані значення, маємо:

$$F_p = AF'_\phi + BF'_c + CF'_p, \quad (15.14)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{\gamma_c \rho_c (1 - u_{\phi.p}) \frac{\varphi}{2} (1 + \rho_\phi u_{\phi.p})}{D}; \\ A &= \frac{\rho_\phi \left[u_{\phi.p} + \gamma_c \rho_c (1 - u_{\phi.p})^2 \frac{\varphi}{2} \right]}{D}; \\ C &= \frac{1 - \lambda_c \rho_\phi \rho_c (1 - u_{\phi.p})^2 \frac{\varphi}{2}}{D}. \end{aligned} \quad (15.15)$$

Проаналізувавши цей вираз, бачимо: параметри рівняння A , B і C являють собою коефіцієнти використання світлових потоків, що безпосередньо падають на фіктивну площину (A), стіни (B) і розрахункову площину (РП) щодо розрахункової площини. Значення коефіцієнтів A , B і C залежать тільки від двох перемінних: властивостей відбиваючих поверхонь освітлюваного приміщення ρ і показника приміщення φ^* .

На підставі цих виразів побудовані графіки й таблиці для можливих комбінацій.

При цьому потрібно врахувати: якщо попередньо розраховане або знайдене за графіком значення коефіцієнта відбиття фіктивної площини ρ_ϕ

помітно відрізняється від табличних, то коефіцієнти A , B і C треба визначати інтерполяцією.

Рівняння (15.14) дозволяє також записати вираз для коефіцієнта використання освітлювальної установки. Оскільки світловий потік світильника, дорівнює сумі потоків F_ϕ , F_c , F_p відповідає потокові джерела світла, рівному 1000лм, вираз для коефіцієнта використання освітлювальною установкою можна записати у вигляді

$$u_{o,y} = (AF'_\phi + BF'_c + CF'_p) \cdot 10^{-3}. \quad (15.16)$$

Для детального розрахунку використовуємо комп'ютерне моделювання світлового середовища або спеціалізовані програми для розрахунку.

16 ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗРОБКИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ

До існуючих вимог до систем освітлення – енергоефективність і комфортність світлового середовища – з швидким розвитком і впровадженням світлодіодів, що дозволяють реалізовувати навіть найсміливіші фантазії дизайнера світла, додалися наступні тенденції створення світлотехнічних установок, які стали не тільки необхідною складовою для нормальної життєдіяльності людини, але й інтегрованою частиною оточуючого простору, який змінюється за бажанням власника.

16.1 Модульне світло – конструктор

Модульна система освітлення – це «гарячий тренд». Купивши набір з декількох окремих деталей, можна створити цілу колекцію світильників за бажанням власника. Крім того, це ще і свого роду розвага і постійна гра. В процесі експлуатації освітлення деякі модульні системи можна розбирати і збирати наново. Таке світло може адаптуватися до моди і стилю життя, постійно змінюючись у просторі. Весною 2011 років іспанський дизайнер Сантьяго Севіляно (Santiago Sevillano) представив миру нову освітлювальну систему під назвою «Гус» (Guss). За допомогою нехитрих елементів кожен власноруч може створити люстру, бра, настінний або напільний світильник. Елементи можуть бути прямолінійними і криволінійними (рис.16.1).



Рисунок 16.1 – Модульна система «Гус» від Сантьяго Севіляно

16.2 Інтеграція в архітектуру

Джерела світла вписані в інтер'єр, невід'ємні від нього. Часто такі системи досить проблематично демонтувати, але застосування їх того коштує. Світло вбудоване, майже «вживлене» в простір, і є з ним одним цілим.

Так, Хайомі Ким (Hyomi Kim), дизайнер з Кореї, з'єднав такі матеріали як плитка і світло. Своє творіння він назвав «Плитка + світло» (Tile + Light). Така система дає можливість збирати хитромудрі візерунки і навіть власне ім'я за

допомогою секторів, що світять, в керамічній плитці. Ця ідея викликала фурор в концепціях освітлення ванних кімнат.

Чарівність японського мистецтва оригамі полягає в тому, що один тільки зайвий згин може призвести до абсолютно нової кінцевої форми. А один зайвий згин стіни, що світиться, «Форма світла» (LightForm – рис.16.2) може призвести до більшої або меншої кількості світла в кімнаті, де вона знаходиться. Дизайнери Франческа Роже (Francesca Rogers) і Даніель Гуалені (Daniele Gualeni) створили освітлювальний прилад, що є цілою стіною, що світить. Щоб сектор почав випромінювати світло, його треба всього лише відкрити. В цьому випадку можливості реалізації безлічі світлових сцен в межах однієї стіни практично не обмежено. Можна створювати свій власний орнамент кожену хвилину, прикладаючи до цього мінімум зусиль.



Рисунок 16.2 – «Форма світла» від Франчески Роже і Даніеля Гуалені

Система 094 (094 system) від Віабіццуні (Viabizzuno), вбудована в гіпсокартон, дозволяє здійснювати різні фантазії архітекторів і дизайнерів. Основою системи є алюмінієвий профіль. Джерелом світла в такій системі може бути практично будь-яке з існуючих джерел: люмінесцентні лампи, металогалогенні і галогенові лампи різних модифікацій, натрієві лампи, світлодіоди. Це інструмент, з яким можна створювати не тільки функціональне освітлення, але і унікальні світлові ефекти. Крім того, система надає можливість інтеграції в неї і інших інженерних систем. Наприклад, вентиляції. Так, одна єдина деталь в інтер'єрі може виконувати вже дві важливі задачі.

16.3 Інтерактивність

Багато можливостей для концепцій освітлення з'явилися з появою на ринку світлодіодів. В першу чергу, це динаміка освітлення. Відкрився широкий простір для фантазії в кольорі і можливості швидкого управління світлом.

Штаб-квартира «Мартін Профешнл» (Martin Professional) ожила завдяки їх власній розробці – професійним світлодіодним дисплеям. Світлодіодні панелі загальною площею 180 м² були розміщені на внутрішньому фасаді будівлі. Незвичайний контент, від данського, дизайн-бюро «Коліжн» (Kollision) співпрацює з відвідувачами по засобам реакції на рухи і переміщення. Такого

роду фасади є не просто архітектурним освітленням, але і могутнім унікальним засобом ребрендинга компанії. Фасад створює зв'язок між контекстом, будівлею, брендом і відвідувачем.

16.4 Інтелектуальне освітлення

Система управління освітленням, один з найпопулярніших і затребуваних тенденцій в освітленні. Автоматичне управління світлом дозволяє не тільки економити електроенергію, але і створює правильну естетичну атмосферу в приміщенні, і повною мірою виправдовує своє звання «інтелектуальної» системи. Понад усе системи управління виправдовують себе в офісних і суспільних будівлях. Існує безліч модифікацій і різновидів систем.

Одним з прикладів є система управління освітленням для суспільних будівель від компанії «Інтелектуальна Архітектура».

У темний час доби контролер K2000T подає команду модулям аналогового управління K2010 на включення світильників, встановлених в коридорах і холах, на запрограмовану мінімальну яскравість, як правило, 10–15% від звичного значення освітленості. При появі в зоні дії датчика руху людини, модуль K2010 перемикає відповідну групу світильників в режим 100% яскравості.

Під час вступу певного імпульсу із станції пожежної сигналізації, у разі виникнення пожежі, освітлення всієї будівлі автоматично перемикається в режим повної яскравості.

При ремонті ліфта (ліфтів) контролер, одержавши сигнал про відключення головного вимикача ліфта, автоматично переводить освітлення міжповерхових сходових маршів в режим повної або підвищеної яскравості.

Якщо в коридорах офісу встановлені відеокамери, можна запрограмувати рівень яскравості в нічному режимі в межах 6–7% – цього буде достатньо для роботи системи відеозапису. При цьому з мінімальною яскравістю працюватимуть всі світильники, а не вибірково аварійні, як при звичній схемі освітлення, що дозволить одержати відеозапис вищої якості без темних зон. Якщо відеокамери зафіксують рух, система автоматики може перемкнути освітлення цієї зони в режим 100% яскравості.

У свою чергу, для підтримки постійної освітленості робочої поверхні на рівні, наприклад, 400 лк, можна використовувати фотодатчик з вихідним сигналом, що автоматично управляє електронними баластами світильників в приміщеннях з великими вікнами. На кожне приміщення необхідно два–три такі датчики – поодиночі на кожну групу світильників. Фотодатчик підтримує заданий рівень освітленості, автоматично регулюючи світловий потік підключеної до нього групи світильників залежно від рівня природного світла, проникаючого в приміщення. Живлення датчик одержує від електронних баластів.

Системи управління освітленням популярні і серед приватної архітектури. Наявність декількох сценаріїв освітлення і можливість управління світловим кліматом з портативного пульта або прямо зі свого телефону є дуже

привабливою для замовників. Сучасні технології дозволяють регулювати яскравість, напрям освітлення і рівень розташування світильника над підлогою. Таким чином, можна створити острівки світла, химерні тіні на стінах і стелях, виділити підсвічуванням найцікавіші з композиційної точки зору предмети інтер'єру (рослини, картини і ін.). Можна створити режим, коли світлитимуться: витвори мистецтва, якщо ви колекціонер; тільки торшер, якщо в дану хвилину ви віддаєте перевагу спокою і самоті; все освітлення відразу, якщо ви збираєте гостей. Кількість варіантів обмежена лише фантазією. Таким прикладом може служити приватна квартира в Швеції від «Бехрер і Партнери» (Behrer & Partners).

16.5 Екодизайн

І нарешті, остання по порядку, але не остання по значенню тенденція у сфері освітлення – екологічність. Разом з боротьбою за зниження споживання електроенергії у всіх її проявах, все більше і більше стають популярні світильники з натуральних матеріалів. Дизайнери щосили прагнуть поєднувати новітні технології з природними компонентами. Освітлювальні прилади з пластика і гуми поступово поступаються місцем дерев'яним і металевим виробам. Відроджується мода на кришталь, скло і сталь. Все частіше можна зустріти світильники, в яких використані бамбук, ротанг, лоза або інші ще химерніші природні матеріали.

Пристрасть до натурального дерева об'єднує студію «Секто Дизайн» (Secto Design) і корейського дизайнера Квон Дже Міна (Kwon Jae Min). Перші скроїли з дерев'яних стрічок абажур, одержавши цілу серію світильників різних форм і забарвлень. Другий сконструював цільний дерев'яний абажур. Тріщини в ньому зроблені спеціально, вони, на думку дизайнера, підкреслюють натуральну природу матеріалу.

17 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ ДЛЯ ОСВІТЛЕННЯ

17.1 Загальні характеристики світлодіодів

Світлодіоди, або світловипромінюючі діоди (LED – light emitting diodes) відомі з 1970–х років. Два покоління знають їх як індикатори включення і ялинкові гірлянди. Основна перевага «старих» зелених і червоних світлодіодів – малі розміри, що перекривало їх недостатню світловіддачу, яка була навіть гірше ламп розжарювання. Подальші дослідження дозволили підвищити світловіддачу (у експериментальних зразках до 200 люмен / ват) і створити «синій» світлодіод, який має значно більш високу яскравість. Останнє призвело до появи конструкцій, випромінюючих білий колір:

1. Спільне розміщення 3–х світлодіодів: червоного, зеленого і синього, випромінювання яких зміщується з допомогою лінзи (технологія RGB). При створенні системи управління можна отримувати не тільки білий колір, а практично будь-хто. Такі конструкції дозволили створити динамічні системи, включаючи екран комп'ютера, з якого Ви читаете цей текст.

2. Ультрафіолетовий світлодіод, поєднаний з трьома шарами люмінофора, що перетворює ультрафіолетове випромінювання в блакитний, зелений і червоний світло, які в свою чергу разом утворюють білий (аналогічно люмінесцентної лампи).

3. Синій світлодіод з жовто–зеленим люмінофором.

Білі світлодіоди з люмінофорами істотно дешевше, ніж RGB матриці, що дозволило використовувати їх для освітлення. До недоліків такої конструкції можна віднести:

меншу світловіддачу через перетворення світла в люмінофорі;

складність технології та контролю рівномірності нанесення люмінофора на кожен світлодіод;

більш швидке старіння люмінофора в порівнянні з самим світлодіодом.

Термін служби над'яскравих білих світлодіодів менше, ніж у малопотужних сигнальних і становить зазвичай 25 000 годин, що також вражає.

Світлодіоди випромінюють світло у вузькій смузі спектра шириною 20–50 нм. Вони займають проміжне положення між лазерами, які випромінюють в одній довжині хвилі, і лампами, які випромінюють біле світло як суміш широких спектрів. У той же час, основна перевага світлодіодного освітлення – відсутність «смуғасті» спектра, тобто безперервний спектр (на відміну від газорозрядних ламп) при відносно невеликому енергоспоживанні.

Яскравість світіння світлодіодів можна регулювати, але не зниженням напруги, а методом широтно–імпульсної модуляції (ШІМ), для чого необхідний спеціальний блок, що подає на світлодіод імпульсні високочастотні сигнали. На відміну від ламп розжарювання колірна температура при регулюванні яскравості у світлодіодів змінюється дуже мало.

Світлодіодне освітлення інтенсивно розвивається, про нього говорять керівники країни і диктори з телеекрану. У США будуються будинки, в яких

відразу закладається низьковольтна розводка і тільки світлодіодне освітлення. Щороку підвищується планка по світловіддачі світлодіодів. Інформація застаріває буквально за рік.

17.2 Біологічний вплив спектру світлодіодів на стан здоров'я людини

Є аргументи і проти світлодіодів, вони пов'язані не з якістю світлосприйняття, а з біологічним впливом.

Людський організм пристосований під цикли природного освітлення. Вночі, тобто в темряві, нам краще спати, а під впливом випромінювання ясного неба (сонце з'являється пізніше) прокидатися. Виявляється, в організмі є спеціальний гормон – мелатонін, який включає і вимикає нічний режим відновлення організму. Його іноді називають гормоном молодості.

Днем концентрація мелатоніну в крові незначна. Години за дві до звичного часу відходу до сну, концентрація його починає підвищуватися, а в темряві швидко зростає приблизно в 30 разів. Максимальні значення спостерігаються між північчю і 4 годинами ранку, з піком о 2 годині ночі. Спад концентрації завершується після пробудження.

Кількість функцій виконуваних мелатоніном різуче:

- регулювання періодичності сну і сезонної ритміки, включаючи зміну концентрації активних речовин та інших гормонів;
- регулювання діяльності ендокринної системи;
- підвищення ефективності імунної системи;
- участь в регулюванні кров'яного тиску, травного тракту, роботи клітин мозку;
- регулювання статевого розвитку;
- антипухлинну дію, включаючи придушення ракових клітин;
- зміна негативного емоційного стану (рішення краще приймати вранці на «свіжу» голову);
- нейтралізація руйнівних наслідків окислювальних процесів у всіх органах і тканинах (запобігання старіння клітин, аж до видимих проявів у вигляді старіння шкіри).

Таким чином, вночі, під регулюючим впливом мелатоніну, організм людини глибоко очищається, налаштовується робота всіх внутрішніх органів і систем.

Виявилося, що концентрація мелатоніну суттєво знижується при нічному і вечірньому впливі штучного освітлення. Відчутний вплив надає тільки синій ділянку спектра (440–490 нм), що відповідає кольору неба, з максимальним впливом інтервалу 460–470 нм.

Найбільш поширений блакитний світлодіод без люмінофора має максимум випромінювання з довжиною хвилі 468 нм.

При одній годині впливу в пізній вечірній час світлодіодного освітлення або екрана комп'ютера, нічний рівень мелатоніну може знизитися на 3–20%, в залежності від їх якості. Вплив монохромного синього світлодіода вночі позначається навіть при освітленості в 1–4 люкса. Також може впливати

«світлове забруднення» міст при використанні світлодіодного зовнішнього освітлення. Навіть при якісних люмінофорах, світло від білих світлодіодів має велику синю складову. Також треба враховувати, що в процесі експлуатації люмінофор, нанесений на світлодіод, зношується. Сильніше впливають світлодіоди з високою колірною температурою понад 4000 К, так як їх спектр зрушає в синю область. Серйозні виробники стурбовані проблемою і почали вирішувати її за двома напрямками: вдосконалення люмінофорів. В останніх конструкціях світлодіодів рівень синього кольору навіть менше, ніж у звичайних люмінесцентних ламп. створення джерел світла за технологією віддаленого люмінофора, коли він наноситься не на кожен світлодіод, а на зовнішню колбу. Відбувається поступова відмова від синім світлодіодним підсвічування і індикації. Існує так званий ефект Пуркінє – синє світло здається більш яскравим в умовах слабкої освітленості і викликає роздратування.

17.3 Обмеження по застосуванню

Око людини не може нормально сфокусуватися на синіх предметах, контури їх здаються нечіткими. Щоб розглянути щось у синьому світлі, доводиться сильно напружувати очні м'язи. Подібний ефект виникає при використанні неякісних світлодіодів. Групою наукових центрів була проведена робота «Обґрунтування, розробка, підготовка до затвердження та затвердження санітарних норм на підставі проведених досліджень психофізіологічного впливу світлодіодних джерел світла на організм людини». Випробовувані (чоловіки від 18 до 30 років) виконували роботи з високої зорової концентрацією під впливом світла від звичайних растрових світильників зі світлодіодними трубками і від високоякісних типу BetaLux. Порівняння проводилося з впливом на контрольну групу людей, що виконують ту ж роботу під світлом люмінесцентних ламп. У роботі не вивчалися питання передачі кольору і кольоророзрізнення, не проводилося порівняння з освітленням лампами розжарення. В першому випадку виявлено дворазове зниження працездатності і також дворазове підвищення стомлюваності. При роботі з якісними світильниками стомлюваність не перевищувала показників контрольної групи, а працездатність навіть підвищилася на 12%. Тепер медики не забороняють застосовувати світлодіодне освітлення всюди, крім закладів дошкільної, шкільної та професійно-технічної освіти. Треба розуміти, що санітарні норми дають загальний медичний дозвіл, а конкретні умови і норми застосування світильників розшифровуються в ДБН. Останні сьогодні вважаються Національними стандартами з добровільним застосуванням. У чинному ДБН В. 25–28–2018 відсутні рекомендації щодо застосування світлодіодних світильників в житлових і громадських будівлях, а також виробничих приміщеннях. Спеціалісти стверджують, що існуючі вимоги до застосування світильників на газорозрядних лампах і лампах розжарювання, не застосовні до світлодіодної техніки. Автори вищезгаданого дослідження відзначають, що необхідно створювати принципово нові світлові прилади під ці

джерела світла, але сьогодні відсутня навіть обов'язковість сертифікації джерел світла і світильників по світлотехнічним параметрам.

17.4 Яскравість світлодіодів

Показник питомої густини потужності, що характеризує щільність світлового потоку, у стандартній люмінесцентній лампі становить 0,1–0,2 Вт / см², а у над'яскравого білого світлодіода близько 50 Вт / см². Світлодіоди можуть засліплювати людину. Світильники, призначені для роботи зі світлодіодами, повинні мати так званий «захисний кут» поширення світла, що попереджає попадання в поле зору людини прямого випромінювання. У міру збільшення одиничної потужності світлодіодів, кількість їх в одному світильнику стає менше і оптична система, що направляє світло в потрібному напрямку відіграє все більшу роль. Вимоги щодо дотримання захисного кута включено в СанПіН одночасно з дозволом на використання світлодіодів, але для побутового споживання світлодіоди продаються в основному у вигляді ламп, окремо від світильників. На будь-якому будівельному ринку ви знайдете також різні конструкції з над'яскравих світлодіодів застосовуються без будь-якого захисту. Багато, через незнання, застосовують світлодіодні стрічки з яскравих світлодіодів, взагалі без будь-якого розсіювання.

17.5 Якість

Багато виробників світлодіодів позначають їх термін служби в 50 і навіть 100 тисяч годин. В даний час немає ніякого стандарту, що визначає для світлодіодів, а що таке власне «термін служби». Не визначено, як повинна працювати лампа після закінчення цього терміну. Деякі провідні компанії були змушені самостійно визначати критерії для терміну служби, наприклад, зниження світлового потоку на 30%. Цікаво, що ними декларується менший термін служби, ніж у «халтурних» виробників. Немає також стандартів, що визначають кількісний норматив можливої зміни кольоровості світлодіода. Виготовлення світлодіодів – це складне виробництво з високими вимогами до комплектації і технологічних операцій, які тривають кілька годин. У нормальних виробників велика частина готових матриць світлодіодів йде в відбраковування. На освоєння нового серйозного виробництва, від завершення будівництва, до початку серійного випуску, йде 1–3 року. Всі виробники працюють над збільшенням світловіддачі окремих діодів для зниження собівартості люмена. Основний шлях – збільшення струму, що протікає через світлодіод. Виникає при цьому проблема необхідності відведення більшої кількості тепла вирішується складними технологічними методами. Більшість азійських виробників довго не мучилися і просто підняли величину струму. Використовуючи чіпи для підсвічування екранів, і, подаючи на них великий струм, можна домогтися яскравого світіння. Важливим є те, що всі характеристики світлодіодних ламп на момент продажу виявляються відповідними паспортними. Реальний термін служби таких світлодіодів не

перевищує 1000 годин, так як за цей час світловий потік знижується мінімум в 2 рази. Проблеми виникають і з епоксидним корпусом світлодіода, що займає більшу частину його обсягу. Від перегріву змінюються його характеристики, і вигорає фосфорний люмінофор. Лампа починає світити більш синім кольором. На характеристики світлодіодів впливає також низька якість джерел живлення. Світлодіоди працюють на низьковольтній постійній напрузі, навіть невелика зміна якого призводить до суттєвих змін струму і, відповідно, світлотехнічних характеристик. Багато, з метою ще більшої економії, просто нехтують необхідністю стабілізації струму. Наші магазини наповнили світлодіодні лампи моторошного якості, і за законом їх постачальники не несуть ніякої відповідальності. Серйозні виробники опинилися в умовах недобросовісної конкуренції, і їх світлодіодну продукцію дуже важко знайти в широкому продажі.

Завдяки малим розмірам, можливості максимально ефективно використовувати світловий потік, майже монохроматичному спектральному складу випромінювання, вібростійкості, низьковольтному живленню постійним струмом, світлодіоди дозволяють реалізувати *нові технічні рішення*, наприклад:

- використовувати відновлювані джерела енергії для живлення ОП;
- здійснювати «діалог зі світлом» – інтерактивні системи освітлення;
- інтегрувати світлові елементи в меблі, конструкції будівель, і т. д. ;
- створювати світло–колірне середовище, що змінюється протягом часу.

Таким чином, застосування світлодіодного освітлення в більшості будівель і споруд доцільне з міркувань енергозбереження: забезпечення високих нормованих рівнів освітленості можна досягти при значному зменшенні споживаній потужності системи освітлення зі світлодіодами. Однак слід вибирати продукцію з сертифікатами якості, що гарантує наявність необхідних параметрів джерел світла.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5–28–2018. Природне і штучне освітлення. Чинний від 01.03.2019. – Київ : Мінбуд України, 2018. – 133 с.
2. Дехофф П. Качество внутреннего освещения / П. Дехофф // Светотехника. – 2004. – № 3. – С. 18–24.
3. Васильєва Ю. О. Оцінка об'єднаного показника дискомфорту у програмі DIALUX / Ю. О. Васильєва, О. М. Ляшенко // Метрологія та прилади. – 2017. – № 2. – С. 30–34.
4. Назаренко Л. Якісна оцінка світлового середовища у приміщеннях за критерієм насиченості світлом / Л. Назаренко, Ю. Васильєва, О. Ляшенко // Метрологія і прилади. – 2016. – №2. – С. 62–67.
5. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга ; 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Знак, 2006. – 972 с.
6. Васильєва Ю. О. Методика проєктування освітлення спортивних споруд за допомогою сучасного програмного забезпечення Ю. О. Васильєва, Е. Н. Ляшенко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 45–52.
- 7 EN 12464–1:2011 Light and lighting– Lighting of work places –Part 1: Indoor work places. – Brussels: CIE. – 117 p.
8. The IESNA Lighting Handbook. Ninth Edition. – New York. : IESNA Publications Department, 2002. – 1100 p.
- 9 Alliance for Solid–State Illumination Systems and Technologies (ASSIST). A Method for Estimatin Discomfort Glare from Exterior Lighting Systems. Troy, NY: Lighting Research Center, 2011.
- 10 Osterhaus WKE, Bailey IL. Large area glare sources and their effect on discomfort and visual performance at computer work stations. Proceedings of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 4–9 October 1992. Houston, Texas.
11. Васильєва Ю. О. Опыт проектирования светодиодных систем освещения для атомных электростанций / Ю. О. Васильєва, А. Л. Васильєв, Е. Н. Ляшенко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2014. – №3 – 4. – С.19–27.
12. Васильєва Ю. О. Проектирование систем освещения производственных зданий / Ю. О. Васильєва, Е. Н. Ляшенко, А. Л. Васильєв // Світлотехніка та електроенергетика. – 2013. – № 3 – 4 (35 – 36). – С. 42–48.
13. Васильєва Ю. О. Световой аудит: оптимизация потребления электрической энергии при освещении учебных классов / Ю. О. Васильєва, А. Л. Васильєв, Е. Н. Ляшенко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – № 3(47). – С. 20–25.
14. Neyezhmakov P. Increasing the reliability of calculation methods for determining illuminance / P. Neyezhmakov O. Liashenko, E. Timofeev // Ukrainian Metrological Journal – Kharkiv: National Scientific Centre "Institute of Metrology", 2018. – №2. – P. 26–33.

Навчальне видання

ЛЯШЕНКО Олена Миколаївна,
ВАСИЛЬЄВА Юлія Олегівна

СВІЛОТЕХНІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної і заочної форм навчання за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *О. М. Ляшенко*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *О. М. Ляшенко*

План 2016 , поз. 110Л

Підп. до друку 29.05.2018. Формат 60 × 84/16.
Електронне видання. Ум. друк. арк. 5,2.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК 5328 від 11.04.2017.