

УДК628.921

Егорченков Владимир Алексеевич

Кандидат технических наук, доцент,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ В ЗДАНИЯХ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ОСВЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА РАЗЛИЧЕНИЯ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

***Аннотация.** Одним из путей повышения энергоэффективности систем освещения зданий является переход на более эффективные критерии оценки, для которых необходимы их требуемые значения. В настоящее время они определяются путем проведения сложных и дорогостоящих экспериментов. В работе осуществлена попытка определения требуемых значений параметров светового поля теоретическим путем на основе метода моделирования условий освещения объекта наблюдения с применением точечного исчисления. Модель объекта наблюдения сформирована множеством точек сканирования, в ячейках между которыми определялись освещенность и яркость. Рассмотрены два варианта расположения светильника. Первый вариант оказался более энергоэффективным, хотя абсолютные уровни освещения были ниже чем во втором варианте. Повышение энергоэффективности систем освещения достигнуто путем рационального размещения светильника, в результате которого яркостные контрасты были выше.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность; система освещения; требуемые значения параметров освещения; точечное уравнение; освещенность; яркость; контраст*

Постановка проблемы

В настоящее время высокий уровень потребления энергии и ее значительная стоимость приводят к поиску путей повышения энергоэффективности здания и его систем энергообеспечения, которые формируют комфортные условия пребывания в зданиях.

Световая среда в производственных помещениях, как известно, оказывает большое влияние на производительность труда, самочувствие человека и энергоэффективность зданий. Особенно остро это проявляется при точных зрительных работах (I-IV разряды зрительных работ [1, 2]). Для того, чтобы сохранить производительность труда на высоком уровне, необходимо работающим на производстве повышать уровни освещенности, затрачивая при этом значительное количество энергии.

Свет обладает как количественными, так и качественными характеристиками. В практике проектирования систем освещения основное значение, как правило, придают учету количественных характеристик, а качественные характеристики представляются лишь общими рекомендациями. Хотя именно они могут играть

существенную роль в приемлемости той или иной системы освещения помещений.

Анализ основных исследований и публикаций

В последнее время исследователи все больше приходят к выводу о том, что в качестве критерия оценки условий освещения должен приниматься универсальный комплекс количественных и качественных параметров [3]: средняя сферическая освещенность, модуль светового вектора, его направление и контрастность освещения.

Для перехода на оценку условий освещения по данному комплексу характеристик необходимы их требуемые значения для каждой зрительной операции, которые служат основанием для введения их в нормативные документы. Определение требуемых значений световых параметров осуществляется путем проведения натурных или лабораторных экспериментов. Эти исследования проводятся уже на протяжении нескольких десятилетий [4 – 10 и др.].

Общая схема проведения таких исследований такова. На первом этапе изучаются особенности производства. Этот этап включает натурные

наблюдения и тщательный анализ технологических процессов в действующих цехах. На основе этого выбираются объект наблюдения и различия, а также критерии оценки, которые в наибольшей степени характеризуют условия освещения объекта.

На втором этапе работы определяется зависимость зрительной работоспособности от величин выбранных пространственных характеристик светового поля. Для этого разрабатывается опытное рабочее место и тест-объекты. Отбирается необходимое количество испытуемых, с которыми для получения соответствующего объема статистических показателей исследования проводятся много раз, затрачивая при этом продолжительное время.

В результате проведения таких исследований определяется наиболее эффективная система освещения [9].

Как видно, на проведение таких исследований требуется много средств и времени. А зрительных операций тысячи и тысячи. Поэтому необходимо найти такие способы определения требуемых значений, которые не имели бы больших затрат.

В основе своей различие объектов наблюдения обеспечивается яркостным контрастом между элементами наблюдения и фоном, а вышеперечисленные характеристики позволяют подобрать такие системы освещения, которые позволяют создать необходимый контраст.

Формулирование цели статьи

Целью данной работы является повышение энергоэффективности систем освещения в зданиях, которое достигается путем рационального размещения светильников, на основе моделирования условий освещения объекта различения с использованием точечного исчисления.

Идея повышения энергоэффективности заключается в следующем. Видимость объекта различения зависит от многих факторов: яркостного контраста между объектом различения и фоном, углового размера объекта различения, яркости фона и др. Но основное значение для условий видимости имеет яркостной контраст. В литературных источниках имеется достаточный объем информации по яркостным контрастам, благоприятным для восприятия объектов различения при соответствующей световой обстановке [11–13]. Принимая это во внимание, рассчитываются яркости элементов наблюдения и определяются контрасты между этими элементами. Если яркостной контраст соответствует требуемому (или максимальному), то при этом положении наблюдателя и объекта определяются остальные

параметры освещения. Если не соответствует, то изменяя положение объекта и источника света, а также величину светового потока, доводят яркостной контраст до требуемой величины. При этих условиях также определяются остальные параметры освещения, считая их благоприятными. Только в этом случае система освещения будет наиболее энергоэффективной.

Основная часть

При теоретическом определении требуемых параметров первый этап, о котором говорилось в начале работы, остается в данном случае без изменения. Изучается технология производства со зрительными задачами, на основе которого выбирается объект наблюдения и объект различения.

На втором этапе осуществляется геометрическое моделирование поверхностей объекта различения, участвующих в формировании яркостных контрастов.

Третий этап посвящен разработке программного обеспечения.

На четвертом этапе проводятся исследования по определению рациональных условий освещения объекта различения и выбирается наиболее эффективная система освещения.

В качестве примера рассмотрим царапину, имеющую треугольную форму, на какой-либо поверхности (рис.1). И поверхности царапины и поверхность материала имеют диффузное отражение. Этот случай довольно часто имеет место при обработке деталей до соответствующего уровня.

Допустим, имеется источник света с известной кривой распределения силы света I и величиной светового потока F . Эти данные представлены в паспорте к каждому светильнику. Световой поток падает на поверхность, на которой находится объект различения, включающий четыре элемента; 1, 2, 3, 4. Задаются координаты вершин каждого элемента объекта различения. Например, для элемента 1: A_0, A_1, A_5, p_1 и q_1 . Задаются также координаты светильниках x_{IC}, y_{IC}, z_{IC} . Поскольку световые параметры распределяются по элементам объекта различения неравномерно, то формируется множество точек сканирования путем составления точечных уравнений для каждого элемента [14]:

Общее уравнение точек сканирования по всем элементам будет иметь следующий вид [15]:

$$M_{ijk} = M_{A1} + M_{A2},$$

$$M_{A1} = (A_{k+1} - A_k) [(1 - \tau_1) \tau_1 + p_{k+6} \tau_1 \tau_1], \quad (1)$$

$$M_{A2} = (A_{k+5} - A_k) [\tau_1 (1 - \tau_1) + q_{k+6} \tau_1 \tau_1] + A_k,$$

где k – порядковый номер вершин каждого элемента;

t_1 и τ_1 – параметры уравнения:

$$t_1 = \frac{i}{m}, \quad i=0,1,2,\dots,m; \quad \tau_1 = \frac{j}{n}, \quad j=0,1,2,3,\dots,n.$$

p_5 и q_5 – относительные координаты точки A_6 (при прямоугольном элементе эти координаты равны единице).

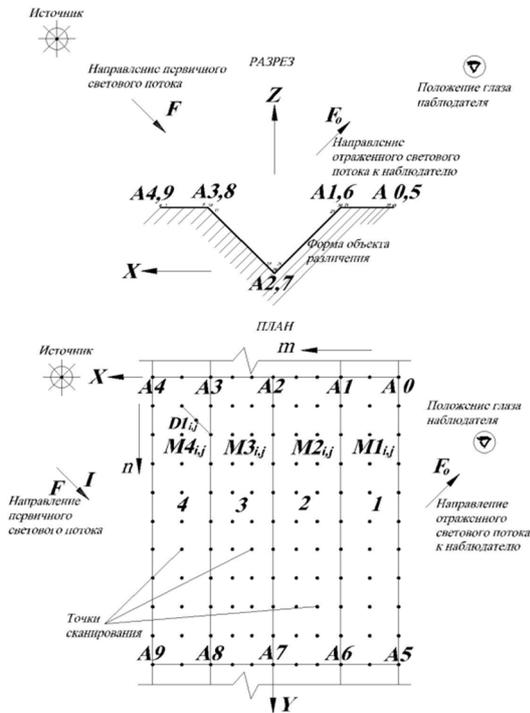


Рисунок 1 – Модель объекта различения

Итак, полученоточечное уравнение, которое определяет координаты точек сканирования. Четырехсоседние точки образуют ячейки, внутри которых параметры постоянны. Причем, чем больше подобных ячеек, тем выше точность.

Параметры освещения определяются в средней точке каждой ячейки, которая может быть представлена средней точкой диагоналя ячейки. Вычисляются координаты этой точки.

$$D_{ijk} = (M_{ijk} + M_{i+1,j+1,k})/2, \quad (2)$$

Освещенность в центре каждой ячейки определяется по формуле:

$$E_{ijk} = I_{\alpha(ijk)} \cdot \cos \alpha_{ijk} / ICD_{ijk}^2, \quad (3)$$

где $I_{\alpha(ijk)}$ – сила света в направлении центра данной ячейки D_{ij} ;

ICD_{ijk} – расстояние от источника света до центра данной ячейки:

$$ICD_{ijk}^2 = (xIC - xD_{ijk})^2 + (yIC - yD_{ijk})^2 + (zIC - zD_{ijk})^2, \quad (4)$$

α_{ijk} – угол между направлением силы света и нормалью в центре ячейки.

Искомый угол определяется следующим образом (рис.2). Сначала определяется нормаль к плоскости $M_{ijk}M_{(i+1)jk}D_{ijk}S_{ijk}(x_{S_{ijk}}, y_{S_{ijk}}, z_{S_{ijk}})$, которая характеризуется, как точка выхода из плоскости.

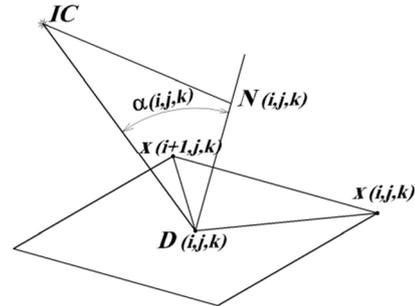


Рисунок 2 – Параметры для определения косинуса угла α_{ijk} .

Определяется по координатный алгоритм этой точки.

$$\begin{aligned} x_{S_{ijk}} &= 0.5(y_{(i+1)jk} z_{ijk} + y_{ijk} zD_{ijk} + yD_{ijk} z_{(i+1)jk} - \\ &- yD_{ijk} z_{ijk} - y_{(i+1)jk} zD_{ijk} - y_{ijk} z_{(i+1)jk}) \\ y_{S_{ijk}} &= 0.5(z_{(i+1)jk} x_{ijk} + z_{ijk} xD_{ijk} + zD_{ijk} x_{(i+1)jk} - \\ &- zD_{ijk} x_{ijk} - z_{(i+1)jk} xD_{ijk} - z_{ijk} x_{(i+1)jk}) \\ z_{S_{ijk}} &= 0.5(x_{(i+1)jk} y_{ijk} + x_{ijk} yD_{ijk} + xD_{ijk} y_{(i+1)jk} - \\ &- xD_{ijk} y_{ijk} - x_{(i+1)jk} yD_{ijk} - x_{ijk} y_{(i+1)jk}) \end{aligned} \quad (5)$$

Определяются координаты точки, принадлежащей нормали плоскости:

$$N_{ijk} = S_{ijk} + D_{ijk}. \quad (6)$$

Определяются длины остальных сторон треугольника $ICN_{ijk}D_{ijk}$ и ND_{ijk} по аналогии с (4):

В результате косинус угла между плоскостями определится следующим образом

$$\cos \alpha_{ijk} = \frac{ICD_{ijk}^2 + ND_{ijk}^2 - ICN_{ijk}^2}{2ICD_{ijk}ND_{ijk}}. \quad (7)$$

Яркость каждой ячейки определяется, при условии отражения поверхности по закону Бугера, по формуле:

$$L_{ijk} = E_{ijk} \cdot \rho / \pi, \quad (8)$$

где ρ – коэффициент отражения материала поверхности.

Величина освещенности E_{ijk} определяется с учетом многократного отражения между элементами объекта наблюдения по известной методике [16].

Яркостные контрасты определяются по следующим зависимостям:

$$K_{21} = \frac{|L2_{ijk} - L1_{ijk}|}{L1_{ijk}}; \quad K_{32} = \frac{|L3_{ijk} - L2_{ijk}|}{L2_{ijk}};$$

$$K_{43} = \frac{|L4_{ijk} - L3_{ijk}|}{L3_{ijk}},$$

здесь цифровые индексы обозначают номера элементов объекта наблюдения.

Меняя положение источника освещения можно добиться требуемой (или максимальной) величины контраста освещения. При найденном положении определяются известными способами параметры световой обстановки, которые и будут являться благоприятными. При необходимости можно осуществить экспериментальную проверку определенной теоретическим путем световой обстановки (например, субъективным методом) в натуральных или лабораторных условиях.

В настоящее время разрабатывается программа формирования требуемых параметров условий освещения объекта наблюдения в среде Mathcad15. Однако уже получены предварительные результаты численного эксперимента (рис.1, табл.1 и 2).

Условия эксперимента следующие. Размер объекта наблюдения 200×200 мм, объект различения – царапина треугольной формы – с размером в плане 1 мм, глубина 0,5 мм. Материал объекта древесина, гипсокартон и т.п. с равномерным отражением $\rho = 0,5$. Светильник с равномерным распределением силы света (в виде молочного шара) $I = 300$ кд/м². Его расположение для первого варианта сбоку: $xIC = 1$ м, $yIC = 0$, $zIC = 1,5$ м (рис.1). Результаты расчетов по первому варианту представлены в табл.1.

Расположение светильника по второму варианту по центру объекта различения (в плане): $xIC = 0$, $yIC = 0,2$ м, $zIC = 1$ м. Результаты расчетов по второму варианту представлены в табл.2.

Методика определения благоприятных значений параметров освещения теоретическим путем заключается в следующем.

1. Моделируются объект наблюдения и объект различения со всеми необходимыми элементами.

2. Задаются координаты элементов объекта наблюдения и источников освещения.

3. Составляются точечные уравнения для каждого элемента объекта наблюдения и различения, формируется поле точек сканирования.

4. Четыре соседние точки сканирования образуют ячейки, в центрах которых определяется освещенность и яркость.

5. На поверхностях объекта различения вычисляется прирост освещенности за счет многократного отражения света друг от друга.

6. Определяется окончательная яркость всех элементов и подсчитываются яркостные контрасты. Осуществляется анализ яркостных соотношений.

7. Путем изменения геометрических параметров взаимосвязи системы освещения и объекта наблюдения яркостные соотношения доводятся до требуемых.

8. При найденном требуемом значении яркостного контраста определяются необходимые параметры световой обстановки. Это и будут требуемые значения параметров света, при которых будет максимальная производительность зрительного труда и энергетическая эффективность.

9. При необходимости проводится небольшой проверочный эксперимент в лабораторных или натуральных условиях (легче всего, по субъективной оценке).

Выводы

1. Одним из путей повышения энергетической эффективности систем освещения является переход на более эффективные критерии оценки световой среды в помещениях. Для проектирования систем освещения с их использованием необходимо определить требуемые значения этих критериев, которые определяются в настоящее время посредством проведения сложных и дорогостоящих экспериментов в натуральных условиях. Поэтому в данной статье осуществлена попытка найти теоретический подход к этой проблеме.

2. Разработана методика теоретического определения требуемых значений параметров светового поля при технологических операциях, имеющих простые формы объектов различения

3. Как видно из проведенного численного эксперимента даже повышение освещенности и яркости не дало положительного результата, поскольку яркостной контраст во втором примере более низкий, о чем говорилось в начале статьи. И, естественно, вероятность обнаружения объекта различения (царапина треугольной формы) будет меньше, чем в первом примере. Поэтому в первом примере световая обстановка будет более энергоэффективной, чем во втором примере

4. В данной работе сделан первый шаг в области теоретического определения требуемых значений параметров светового поля. В перспективе исследования будут направлены на разработку методик для сложных объектов наблюдения и предметов различения, подстраиваясь непосредственно к технологическому процессу.

5. Данные исследования послужат основой для разработки программы моделирования и расчета требуемых параметров световой среды для многих технологических операций, что позволит сократить средства и время получения подобных данных и быстрее внедрить наиболее эффективные критерии оценки в практику проектирования условий освещения на производстве. при которых будет

наблюдаться не только высокая производительность труда, но и сведены к минимуму профессиональные заболевания органов зрения.

6. С использованием полученных результатов можно осуществлять не только светотехническую оценку, но и оценку по энергетической эффективности различных вариантов систем освещения при проектировании зданий.

Таблица 1 – Результаты расчета яркостных контрастов между соседними элементами на изгибах по 1-му варианту условий освещения (источник сбоку)

№ Ячейки по j	Яркости ячеек по i и контраст между ними.								
	10	11	K ₂₁	20	21	K ₃₂	30	31	K ₄₃
1	12.315	14.385	0,144	14.382	2.877	0,8	2.88	12.553	0,77
3	12.224	14.279	0,144	14.276	2.856	0,8	2.859	12.459	0,77
5	12.063	14.093	0,144	14.09	2.818	0,8	2.821	12.294	0,77
7	11.837	13.83	0,144	13.827	2.766	0,8	2.769	12.06	0,77
9	11.552	13.499	0,144	13.496	2.7	0,8	2.702	11.766	0,77

Таблица 2– Результаты расчета яркостных контрастов между соседними элементами на изгибах по 2-му варианту условий освещения (источник по центру)

№ ячейки по j	Яркости ячеек по i и контраст между ними.								
	10	11	K ₂₁	20	21	K ₃₂	30	31	K ₄₃
1	46.415	32.834	0,293	32.791	32.8	0,00	32.844	46.358	0,292
3	47.531	33.623	0,293	33.578	33.588	0,00	33.633	47.471	0,292
5	47.759	33.785	0,293	33.739	33.749	0,00	33.795	47.699	0,291
7	47.079	33.304	0,293	33.259	33.269	0,00	33.314	47.021	0,292
9	45.554	32.225	0,293	32.183	32.192	0,00	32.234	45.499	0,292

Литература

1. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Інженерне обладнання будівель і споруд. – К.: Мінбуд України, 2006. – 76 с.
2. Природне і штучне освітлення. ДБН В.2.5-28-2006. Зміна № 2. – К.: Мінбуд України, «Укрархбудінформ», 2012. – 36 с.
3. Гупоров М.М. Тенеобразующие свойства света. Труды МЭИ. – М.: Изд-во МЭИ, 1955, вып.2. – 10 с.
4. J.V.Collins. The successor to PSALI, Lighting Equip. News (London), June. 1982, p.p.97-108.
5. Глаголева Т.А., Мешикова О.К. Зрительная работоспособность при кратковременной и длительной работе. Светотехника №7. М.1975.
6. Weston H. The relation between illumination and visual performance. – London, 1953.
7. Гуревич М.М., Шайкевич А.С. Видимость объемных деталей в различных условиях освещения.// Светотехника. 1962.-№2.
8. Иванченко В.Т. Определение оптимальной световой обстановки в цехах приборостроительных заводов. В кн.: Функциональные и технические проблемы архитектуры: Сборник трудов / Московский инж.-строит. ин-т. Вып.168.-С., 1977.
9. Егорченков В.А., Соловьев А.К. Проектирование систем естественного освещения промышленных зданий с использованием пространственных характеристик световой среды. Промышленное строительство №7. М.1983.
10. Хамидов К.А. Совершенствование естественного освещения в производственных зданиях с использованием пространственных характеристик светового поля (на примере предприятий швейной промышленности).: Дисс.....канд.техн.наук. – М. 1988.
11. Blackwell H. Contrast thresholds of the human eye, Journ. Opt. Soc. Am., 1946, № 10.
12. Lighting for Sawmill redwood green chain. – “The illuminating Engineer”. 1957, № 7.
13. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. Учебное пособие для вузов. – М.: «Энергия», 1972. – 360 с.

14. Балуба И.Г., Найдых В.М. Точечное исчисление / Учебное пособие – Мелитополь: Изд-во МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015 – 234 с.
15. Егорченков В.А. Средняя яркость четырехугольного окна в условиях полужасного неба/Міжвідомчий науково-технічний збірник "Прикладна геометрія та інженерна графіка". Випуск 87. Відповідальний редактор В.Є. Михайленко. – К.: КНУБА, 2011. – С. 128-132.
16. Егорченков В.О. Принципи побудови моделі світлового середовища приміщень з криволінійними поверхнями/Комп'ютерно-інтегровані технології: Освіта, наука виробництво. – Луцьк: Видавництво ЛНТУ, 2015. № 20. – с. 27-32

Стаття надійшла в редколегію 29.03.2017

Рецензент: д.т.н., проф. О.В. Сергейчук, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Єгорченков Володимир Олексійович

Кандидат технічних наук, доцент,

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ В БУДІВЛЯХ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ОСВІТЛЕННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРІЗНЕННЯ НЕСКЛАДНОЇ ФОРМИ

Анотація. Одним із шляхів підвищення енергоефективності систем освітлення будівель являється перехід на більш ефективні критерії оцінки, для яких необхідні їх потрібні значення. В теперішній час вони визначаються шляхом проведення складних і дорогих експериментів. В роботі здійснена спроба визначення потрібних значень параметрів світлового поля теоретичним шляхом на підставі метода моделювання умов освітлення об'єкта спостереження з використанням точкового числення. Модель об'єкту спостереження сформована множиною точок сканування, в комірках між якими визначались освітленість і яскравість. Розглядані два варіанти розташування світильника. Перший варіант виявився більш енергоефективним, хоча абсолютні рівні освітлення були нижче ніж в другому варіанті. Підвищення енергоефективності систем освітлення досягнуто шляхом раціонального розташування світильника, в результаті якого контрасти яскравості були вище.

Ключові слова: енергоефективність; система освітлення; потрібні значення параметрів освітлення; точкове рівняння; яскравість; контраст

Yegorchenkov Volodymyr

Doctor of Philosophy, Associate Professor,

Kyiv National University of Construction and Architecture (KNUCA), Kiev

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF LIGHTING SYSTEMS IN BUILDINGS BY MODELING LIGHTING CONDITIONS OF DIFFERENCE OF SIMPLE FORM

Abstract. One way to improve the energy efficiency of building lighting systems is to move to more efficient criteria for which their required values are needed, which are currently determined by complex and costly experiments. In this paper, improving the energy efficiency of lighting systems in buildings is achieved through the rational placement of luminaires, which is carried out on the basis of determining the required values of the parameters of the light field in a theoretical way. In this case, a method is used to simulate the conditions for illuminating an observation object using point calculus. For this purpose, a model of an observation object has been developed, on which a number of scan points have been formed on all elements of the object, including the object of discrimination. The cells between the scan points determine the brightness and brightness. Analysis of brightness contrasts allows you to determine the most energy-efficient lighting system. In the paper two variants of the luminaire arrangement are considered. The first option was more energy efficient, although the absolute lighting levels were lower than in the second version.

Keywords: energy efficiency; lighting system; required values of lighting parameters; point equation; illumination; brightness; contrast