

Моделирование в «MATLAB» общего внутреннего освещения с использованием IES-файлов светильников¹

П. МАНДАЛ, Б. РОЙ

Электротехнический факультет Джадавпурского университета, Колката, Индия
E-mail: broy@ee.jdvu.ac.in

Аннотация

Статья посвящена расчёту в среде «MATLAB» параметров установки общего внутреннего освещения. Распределение силы света светильника, известное как IES-файл, извлекается самой разработанной авторами программой в «MATLAB» и используется при последующих светотехнических расчётах. Приведены все этапы этих расчётов и алгоритмы этой программы. Результаты этих расчётов сравниваются с полученными посредством программы «DIALux».

Ключевые слова: светотехнические расчёты, моделирование в «MATLAB», внутреннее освещение.

1. Введение

Данная работа посвящена моделированию общего внутреннего освещения в части определения численных значений параметров и графического представления результатов расчётов в среде «MATLAB». В разработанной программе рассматриваются четыре параметра: а) средняя нормированная освещённость на горизонтальной рабочей поверхности (РП); б) коэффициент равномерности освещённости; в) обобщённый показатель блёскости UGR; г) удельная установленная мощность осветительной установки (ОУ) LPD.

При раздельном вычислении прямой и отражённой составляющих освещённости на РП с целью получения распределения освещённости используют теорию светового поля и другие фундаментальные законы светотехники. Для расчёта UGR при разных положениях наблюдателя и разных линиях наблюдения используют рекомендации МКО.

Особенностями данной работы являются:

1. Включение электронного файла фотометрических характеристик светильника (IES-файла) в разрабатываемую программу в «MATLAB» и извлечение из него требующихся для проведения расчётов данных.

2. Раздельный расчёт прямой и отражённой составляющих освещённости на РП.

3. Модульная организация расчётов проектных параметров с соответствующими алгоритмами и теоретическим обоснованием.

Такой подход к моделированию в «MATLAB» облегчает разработку специальных программ с использованием существующих библиотечных функций и инструментов «MATLAB» для анализа и оптимизации данных. Эта возможность не предусмотрена существующими программами проектирования освещения, такими как «DIALux», «RELUX» или «AGi32».

2. Схема общего внутреннего освещения

Цель общего внутреннего освещения – обеспечение равномерной освещённости на всей РП. Светильники располагаются по матричной схеме, что очень удобно при освещении больших офисов, так как все рабочие места при этом освещаются примерно одинаково и их можно ориентировать по своему усмотрению.

2.1. Параметры

Световая среда, формируемая в рамках описанной схемы общего освещения, характеризуется ниже перечисленными параметрами. Их значения нормируются национальными и международными стандартами, обеспечивающими возможность выполнения планируемой зрительной работы.

а) *Нормированная средняя освещённость на горизонтальной РП E_{cp}*

Этот параметр характеризует количество света, попадающего на все точки рабочей поверхности во всём освещаемом помещении. У новой ОУ связь между нормированным и начальным значениями средней освещённости описывается показателем, известным как коэффициент эксплуатации M.F.:

$$M.F. = \frac{\text{Нормированная средняя освещённость}}{\text{Начальная средняя освещённость}}$$

б) *Коэффициенты равномерности освещённости U_1 и U_2*

Эти параметры характеризуют равномерность распределения освещённости по всей РП и представляют собой отношение минимальной освещённости к средней (U_1) или отношение минимальной освещённости к максимальной (U_2) соответственно. Обычно считают, что общую равномерность освещённости характеризует U_1 .

в) *UGR*

UGR представляет собой показатель качества ОУ внутреннего освещения. Он характеризует зрительный дискомфорт, испытываемый наблюдателями при выполнении ими зрительных задач. На практике значения UGR лежат в пределах от 10 до 30. Чем выше UGR, тем больше для наблюдателя дискомфортная блёскость. Считается, что при UGR < 10 дискомфортная блёскость отсутствует.

г) *LPD*

Этот параметр характеризует установленную мощность ОУ, приходящуюся на единицу площади РП, и считается показателем энергоэффективности ОУ. Есть два способа определения LPD: как отношение установленной мощности ОУ к площади РП или как отношение установленной мощности ОУ к площади РП и 100 лк. Второй вариант более информативен, так как он позволяет определять значение LPD на 100 лк средней освещённости РП.

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

3. Включение IES-файлов в «MATLAB»

IЕС-файлы – это файлы стандартного формата для электронного представления фотометрических данных. Они были предложены в 1986 г. (IESNA LM-63–1986) и применяются большинством производителей светильников для формирования базы данных о светильниках. Кроме того, хорошо известные программы для расчёта ОУ, такие как «DIALux» и «AGi32», совместимы с форматами IЕС-файлов. В данной работе использовался формат IЕС-файлов согласно IESNA LM-63–2002 [1]. Производители светильников предоставляют информацию о них в виде IЕС-файлов. Пример описания IЕС-файла приведён в Приложении 1². Для включения IЕС-файлов в программу «MATLAB» разработана специальная программа, позволяющая переносить в «MATLAB» данные из нужного IЕС-файла. При этом разработан алгоритм извлечения данных о светильнике из IЕС-файла².

4. Методика расчётов

В этом разделе приведены теоретические основы проведения расчётов.

4.1. Освещённости в конкретных точках

В случае внутреннего освещения полная освещённость в точке состоит из двух частей:

1. Прямая составляющая освещённости. – Вклад в освещённость прямого излучения всех источников света ОУ.

2. Отражённая составляющая освещённости. – Вклад в освещённость излучения, отражаемого внутри помещения.

На РП накладывается сетка, в узлах которой рассчитываются значения полной освещённости.

Прямая составляющая освещённости. Для расчёта прямой составляющей освещённости требуется наличие следующих данных: 1) распределение силы света (светораспределение) светильника; 2) местоположение светильника; 3) места расположения узлов сетки; 4) размеры светового отверстия (СО).

Распределение силы света светильника $I_{C, \gamma}$ предоставляется производителем в виде IЕС-файла, содержащего значения силы света светильника в системе координат (C, γ) .

Расчёт горизонтальной освещённости E_D^i в i -м узле сетки осуществляется по закону обратных квадратов [4, 5]:

$$E_D^i = \frac{I_{c_i, \gamma_i} \cdot (\cos \gamma_i)^3}{h_m^2},$$

где $I_{C, \gamma}$ – сила света в направлении i -го узла сетки, C

² Приложение I и алгоритмы приведены в полной версии статьи: Mandal, P., Roy, B. MATLAB Simulation of Indoor General Lighting with Luminaire IES file // Light & Engineering. – 2016. – No. 2.

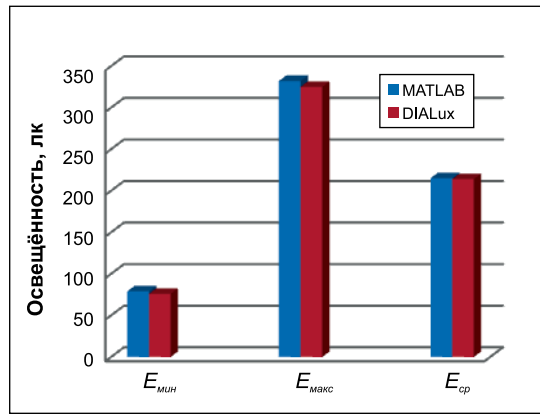


Рис. 1. Рассчитанные для смоделированного помещения значения прямой составляющей освещённости в узлах сетки

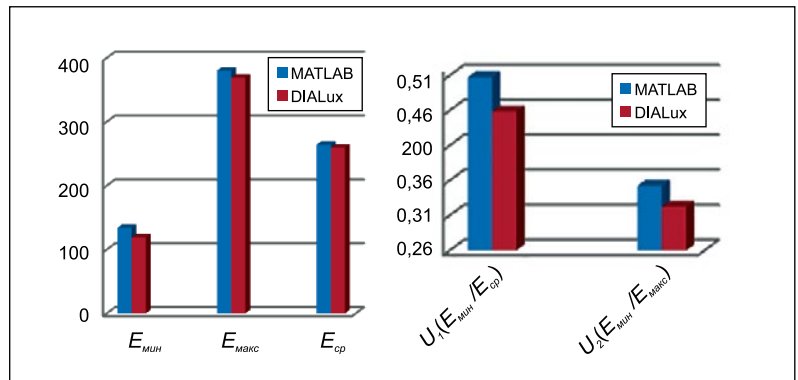


Рис. 2. Рассчитанные для смоделированного помещения значения полной освещённости и коэффициентов равномерности освещённости в узлах сетки

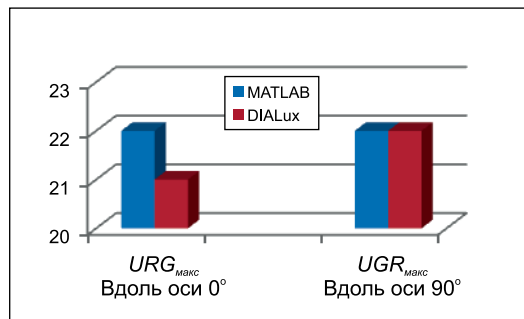


Рис. 3. Рассчитанные для смоделированного помещения значения объединённого показателя блёскости в узлах сетки

и γ – углы, определяющие это направление, h_m – высота установки светильника.

Этот закон применим, если расстояние между узлом сетки и источником света (ИС) по меньшей мере в пять раз больше размера этого ИС. При этом условии светильник с конечной площадью СО считается точечным. В большинстве ОУ для общего внутреннего освещения это условие не выполняется. В этом случае плоскость СО светильника разбивается на совокупность небольших элементарных ИС. Размеры этих ИС выбираются так, чтобы удовлетворялось приведённое выше требование. Светораспределение каждого из этих элементарных ИС рассчитывается в предположении равномерности распределения яркости по СО светильника [4].

Если всё СО площадью A_S разделить на m участков площадью dA_S каждый, то освещённость в i -м узле сетки от j -го элементарного ИС выражается как

$$dE_D^i = \frac{dI_{c_{ij}, \gamma_{ij}} \cdot (\cos \gamma_{ij})^3}{h_m^2},$$

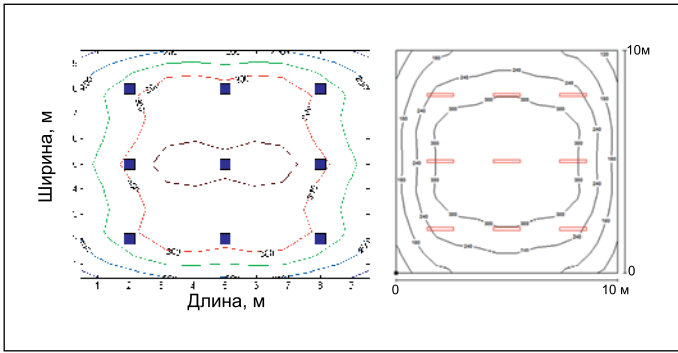


Рис. 4. Изолюксы, полученные в «MATLAB» (а) и «DIALux» (б). Синие квадраты отмечают положение светильников без учёта их реальных размеров

причём для СО с равномерным распределением яркости $dI_{C,\gamma} = K \cdot I_{C,\gamma}$, $K = dA_S/A_S$.

Полная прямая составляющая освещённости в i -м узле сетки от всех m элементарных ИС

$$E_D^i = \sum_{j=1}^m dE_D^i. \quad (1)$$

При наличии нескольких светильников вклад каждого из них рассчитывается по формуле (1) с последующим суммированием полученных результатов.

Отражённая составляющая освещённости. Эта составляющая зависит от формы помещения и коэффициентов отражения поверхностей помещения, светораспределения светильника и расположения узла сетки. Отражённая составляющая освещённости в i -м узле сетки E_R^i описывается выражением [2, 4]:

$$E_R^i = \frac{(\text{Полный световой поток ламп на один светильник}) \cdot RRC}{\text{Площадь РП на один светильник}},$$

где $RRC = WEC + RPM \cdot (CCEC - WEC)$, RRC – коэффициент использования светового потока, обусловленный отражением, WEC – коэффициент светимости стен (*Wall Exitance Coefficient*), RPM – множитель, определяемый геометрией помещения (*Room Position Multiplier*), $CCEC$ – коэффициент светимости полости потолка (*Ceiling Cavity Exitance Coefficient*). Полный световой поток ламп на один светильник определяется посредством умножения количества ламп в светильнике n на световой поток одной лампы θ_i (эти данные содержатся в *IES*-файле светильника), а площадь РП на один светильник – результат деления полной площади РП на количество светильников N , которое обычно определяют на начальной стадии проектирования.

Для расчёта RPM требуется знание значений WEC и $CCEC$, которые зависят от: 1) доли прямого света (DG); 2) доли светового потока в нижнюю полусферу ($DLOR$); 3) доли светового потока в верхнюю полусферу ($ULOR$); 4) индекса помещения (G); 5) коэффициента отражения стен помещения (ρ_1); 6) коэффициентов отражения полостей потолка и пола (ρ_2, ρ_3); 7) долей светового потока светильников, попадающих на стены, потолок и пол (C_1, C_2, C_3).

Параметр RPM указывает положение узла сетки на РП, которое обозначают индексом, состоящим из двух цифр. Этот индекс получают при нанесении на РП сетки с площадью ячейки (10% от длины помещения) \times (10% от ширины помещения).

Значение RPM для конкретного узла сетки получают согласно [3] для соответствующих индекса положения узла и индекса помещения.

Общая освещённость в i -м узле сетки

$$E_T^i = E_D^i + E_R^i.$$

Расчёт E_{cp} , U_1 , U_2 и LPD . Начальная средняя освещённости на РП при n узлах сетки рассчитывается как

$$E_{cp.нач.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_T^i,$$

а нормированная средняя освещённости – как

$$E_{cp.} = E_{cp.нач.} \cdot M.F.$$

Коэффициенты U_1 и U_2 рассчитываются как

$$U_1 = E_{мин}/E_{cp} \text{ и } U_2 = E_{макс}/E_{cp},$$

где $E_{мин}$ и $E_{макс}$ – нормированные максимальная и минимальная освещённости в узлах сетки на РП.

4.2. LPD

Этот параметр рассчитывается по формуле

$$LPD = \frac{\text{Количество светильников} \times \text{Входная мощность светильника}}{\text{Площадь рабочей поверхности}} [\text{Вт}/\text{м}^2]$$

ИЛИ

$$LPD = \frac{\text{Количество светильников} \times \text{Входная мощность светильника}}{\text{Площадь рабочей поверхности} \times 100} [\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}/100 \text{ лк}]$$

Входная мощность светильника берётся из *IES*-файла светильника.

4.3. UGR

Значения UGR в узлах сетки рассчитываются с учётом положения глаз наблюдателя и его линии зрения и зависят от: 1) яркости фона L_b , $\text{кд}/\text{м}^2$; 2) яркости светящейся части каждого из светильников в направлении глаз наблюдателя L , $\text{кд}/\text{м}^2$; 3) телесного угла с вершиной в точке расположения глаз наблюдателя, стягиваемого светящейся частью каждого из светильников ω , ср ; 4) положение светильника по отношению к линии зрения, выражаемое для каждого из светильников при помощи соответствующего индекса позиции (по Гуту) p . Первые два параметра – светотехнические, а два остальные – геометрические.

Рассчитанные для смоделированного помещения значения отражённой составляющей освещённости в узлах сетки, лк

9,545	56	55	54	54	53	53	53	54	54	55	56
8,636	55	54	53	52	52	51	52	52	53	54	55
7,727	54	53	51	51	50	49	50	51	51	53	54
6,818	54	52	51	50	49	49	49	50	51	52	54
5,909	53	52	50	49	49	48	49	49	50	52	53
5	53	51	49	49	48	48	48	49	49	51	53
4,091	53	52	50	49	49	48	49	49	50	52	53
3,182	54	52	51	50	49	49	49	50	51	52	54
2,273	54	53	51	51	50	49	50	51	51	53	54
1,364	55	54	53	52	52	51	52	52	53	54	55
0,455	56	55	54	54	53	53	53	54	54	55	56
м	0,455	1,364	2,273	3,182	4,091	5	5,909	6,818	7,727	8,636	9,545

UGR рассчитывается по формуле [3]

$$UGR = 8 \cdot \log_{10} \left[\frac{0,25 \sum_{k=1}^N L^2 \omega}{L_b \sum_{k=1}^N p^2} \right].$$

L_b рассчитывается в предположении, что все поверхности помещения свет отражают диффузно:

$$L_b = \frac{\text{Средняя светимость стен}}{\pi},$$

$$\text{Средняя светимость стен} = \frac{(\text{Полный световой поток ламп на один светильник}) \cdot WRRC}{\text{Площадь РП на один светильник}}$$

где $WRRC$ – коэффициент отражённого излучения стен (*Wall Reflected Radiation Coefficient*), $WRRC = WEC - WDRC$, а $WDRC$ – коэффициент прямого излучения стен (*Wall Direct Radiation Coefficient*).

Теперь для всех светильников ОУ, находящихся в пределах поля зрения наблюдателя, можно определить значения L , ω и p :

$$L = \frac{I_{c,\gamma}}{A_s \cos \gamma},$$

где $I_{c,\gamma}$ – сила света в направлении глаз наблюдателя, A_s – площадь СО светильника;

$$\omega = \frac{A_s \cos \gamma}{d^2},$$

где d – расстояние между источником света и глазами наблюдателя;

p определяется по таблице индексов позиции [3].

Значения p приводятся в функции отношений H/R и T/R , где H , R и T – проекции линии между ИС и глазами наблюдателя на оси соответствующей системы координат (см. Приложение II). Для получения точных значений p , соответствующих конкретным положениям глаз и ИС, следует пользоваться интерполяцией.

5. Алгоритмы расчёта параметров (см. сноску на с. 53).

6. Результаты расчётов и их сравнение

С помощью разработанной авторами программы в «*MATLAB*» были рассчитаны характеристики внутреннего освещения при следующих значениях входных параметров:

- Размеры помещения, м: длина – 10, ширина – 10, высота – 3,5.
- Коэффициенты отражения поверхностей, %: потолок – 80, стены – 50, пол – 20.
- Высота РП: 0,76 м от уровня пола.
- $M.F.$: 0,8.
- Светильник: «*Mirroroptic*», люминесцентные лампы (*TLD*) 2×36 Вт, электронный ПРА.

Полученные в «*MATLAB*» и «*DIALux*» графические представления результатов расчётов освещённости, привязанные к узлам сетки, приведены на рис. 1–3, а на рис. 4 представлено распределение полной освещённости (изолуксы). Рассчитанные в «*MATLAB*» значения отражённой составляющей освещённости в узлах сетки, приведены в таблице (в «*DIALux*» расчёт этой составляющей не предусмотрен).

Рассчитанные в «*MATLAB*» значения LPD составили $6,66 \text{ Вт/м}^2$ и $2,50 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}/100 \text{ лк}$ (площадь пола 100 м^2) при $E_{cp} = 267 \text{ лк}$, а в «*DIALux*» – $6,66 \text{ Вт/м}^2$ и $2,57 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}/100 \text{ лк}$ (площадь пола 100 м^2) при $E_{cp} = 260 \text{ лк}$.

Авторская программа в «*MATLAB*» позволяет строить трёхмерное изображение распределения освещённости по РП (рис. 5), а в «*DIALux*» построение трёхмерных изображений не предусмотрено.

Было проведено сравнение рассчитанных в «*MATLAB*» значений проектных параметров с результатами расчётов в «*DIALux*». Результаты этого сравнения приведены на рис. 6.

Максимальное расхождение результатов расчётов минимальной прямой составляющей освещённости соста-

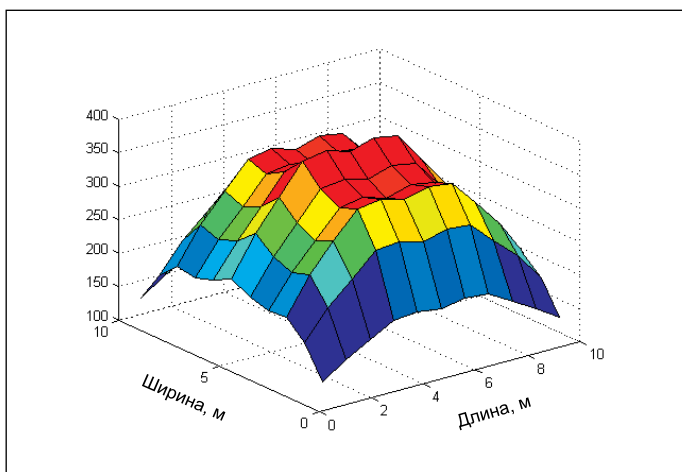


Рис. 5. Трёхмерное изображение распределения полной нормированной освещённости

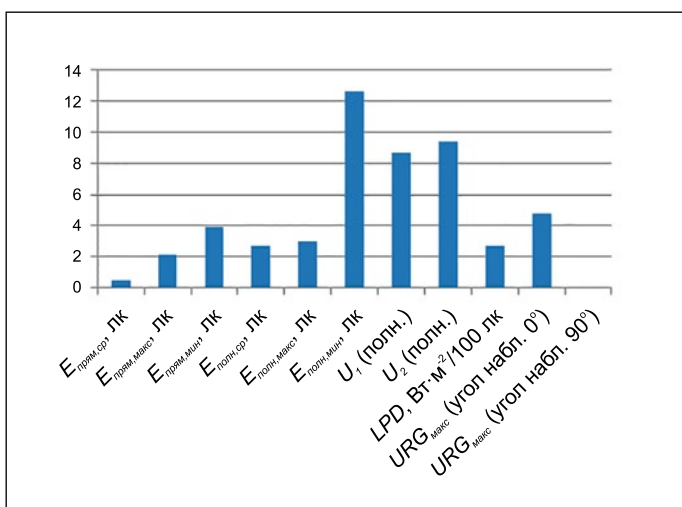


Рис. 6. Расхождение проектных значений параметров, %

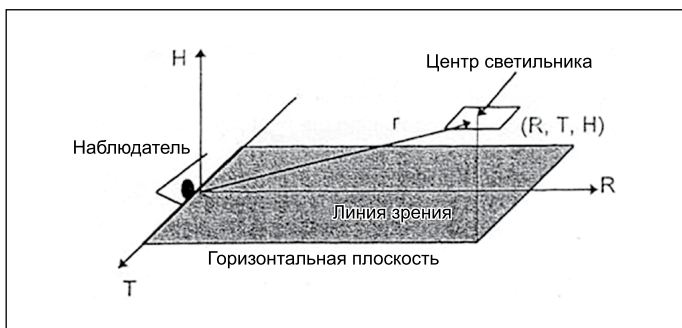


Рис. 7. Система координат для определения индекса позиции [3]

вило 4%, а полной освещённости – 12%. Это различие связано с различиями результатов расчётов отражённой составляющей освещённости. Сравнение значений последней, полученных в «MATLAB», с результатами аналогичных расчётов в «DIALux» невозможно, так как данные об отражённой составляющей в «DIALux» не представляются. Расхождения в результатах расчётов U_1 и U_2 оказались несколько большими (примерно 9%) из-за различий в результатах расчётов минимальной освещённости. Расхождения в значениях $E_{\text{ср}}$, $E_{\text{мин}}$, LPD и $UGR_{\text{макс}}$ не превышали 5%.

7. Выводы

Разработанная авторами программа в среде «MATLAB» позволяет рассчитывать такие параметры внутреннего освещения, как прямая и отражённая составляющие освещённости в узлах сетки на РП, а также яркости светильников и фона в направлении наблюдателя, используя для этого предоставляемые производителями IES-файлы светильников. Кроме того, на основе этих данных можно рассчитывать такие проектные параметры ОУ, как средняя освещённость, коэффициент равномерности освещённости и обобщённый показатель блёскости. Результаты этих расчётов в «MATLAB» хорошо согласуются с полученными в «DIALux». Разработанная авторами программа может быть использована как один из инструментов «MATLAB» для расчётов параметров и оптимизации ОУ.

Приложение I (см. сноску на с. 53).

Приложение II

Центр системы координат (R , T , H) располагается в точке нахождения глаз наблюдателя. Отношения H/R и T/R соответствуют центру светильника (рис. 7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ANSI/IESNA LM-63–02 «Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data», 2002.
- Lindsey, J.L. Applied Illumination Engineering, 2nd Ed. – The Fairmont Press, Inc., 1997. – P. 215–236.
- CIE117 «Discomfort Glare in Interior Lighting», 1995. – P. 1–7.
- IES Lighting Handbook, Reference Volume, 1984. – P. 9–52–9–73.
- Coaton, J.R., Marsden, A.M. Lamps and Lighting, 4th Ed. – Arnold, 1997. – P. 301–317.
- IS-3646 (Part 1) «Code of practice for Interior Illumination», 1992.



Пурнима Мандал (Purnima Mandal), М.Е. (2007 г.). Научный сотрудник светотехнической лаборатории электротехнического факультета Джадавпурского университета



Бисванат Роу (Biswanath Roy), Ph.D. (1999 г.). Профессор электротехнического факультета Джадавпурского университета. Пожизненный действительный член Индийского общества инженеров-светотехников, пожизненный член Общества инженеров (Индия) и член Светотехнического общества Северной Америки