

УДК 628.987

А.Д. Гончаров, В.И. Туев

Универсальный метод расчета коэффициента использования светового потока осветительных приборов

Выполнена разработка универсального метода расчета коэффициента использования светового потока с целью оценки эффективности светораспределения осветительных приборов как для внутреннего, так и для уличного освещения, получены аналитические выражения зависимости коэффициента использования светового потока от индекса помещения. Предложена блок-схема измерительного оптоэлектронного комплекса, рассчитывающего данный коэффициент при обследовании осветительных установок. Выполнена разработка светотехнического калькулятора на основе разработанного метода.

Ключевые слова: коэффициент использования светового потока, кривая силы света, оптоэлектронные приборы.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-50-55

Коэффициент использования светового потока осветительного прибора (ОП) является важным параметром для оценки эффективности кривой силы света (КСС) ОП в конкретной осветительной установке (ОУ), который определяется как отношение полезного светового потока Φ_0 , падающего на заданную плоскость, к полному световому потоку ОП Φ_v . Чем выше значение коэффициента использования, тем эффективней используется световой поток осветительного прибора. Решение задачи по его повышению вносит вклад в энергосбережение, что в настоящее время является одной из приоритетных задач нашего Государства. Коэффициент использования светового потока также необходим для математического расчета освещенности по методу использования светового потока [1], который также широко применяется в светотехнических калькуляторах для расчета освещенности на сайтах известных компаний – производителей осветительных приборов.

Для расчета коэффициента использования светового потока применяются следующие методы:

– точечный метод расчета освещенности [1, 2], при помощи которого определяются освещенности на каждой единичной площадке освещаемой плоскости. Затем на каждой рассматриваемой единичной площадке освещаемой плоскости ОУ проводится расчет световых потоков как произведение освещенности рассматриваемой единичной площадки на ее освещаемую площадь. Полезный световой поток определяется как сумма световых потоков рассматриваемых единичных площадок ОУ. Точность расчета в данном методе зависит от размера рассматриваемых площадок: чем меньше рассматриваемая единичная площадка, тем выше точность расчета коэффициента использования светового потока ОП;

– разбиение КСС светильника на зональные световые потоки с расчетом полезного светового потока [1, 3]. Такой способ аналогичен точечному методу расчета освещенности, но в качестве расчета полезного светового потока рассматриваются зональные световые потоки, которые после многократных отражений от поверхностей помещения

формируют полезный световой поток. В этом случае точность измерения также зависит от размера рассматриваемой освещаемой единичной площадки.

Такие способы из-за большого количества уравнений характеризуются повышенной трудоемкостью и очень велика вероятность допущения ошибок при расчете, а уровень этой ошибки зависит от исполнителя – величина систематической погрешности может быть различной. Ошибка при расчете коэффициента использования светового потока ОП также зависит от степени асимметричности КСС ОП: чем больше световых лучей или зональных световых потоков учитывается при расчете, тем выше точность.

Габаритные размеры ОП также влияют на точность расчета, оценка влияния которой в литературных источниках не обнаружена. Ведь осветительный прибор можно представить в виде полностью светящего потолка либо потолка в виде звездного неба, источники света которого представляют собой квазиточечные источники света, например светодиоды.

Отсутствие единой общепринятой методики, обеспечивающей высокую точность, наглядность и простоту расчета коэффициента использования светового потока ОП делает затруднительным проведение исследований влияния конструктивных, физических факторов на коэффициент использования светового потока ОП, что стало поводом для проведения данной работы.

Таким образом, целью данной работы является разработка нового метода расчета коэффициента использования светового потока осветительного прибора, отличающегося от существующих аналогов повышенной точностью, наглядностью и простотой расчета.

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

- выбор программного обеспечения, позволяющего с высокой точностью проводить расчет освещенности ОУ;
- разработка алгоритма на основе выбранного программного обеспечения;
- оценка отклонений освещенностей, полученных при помощи разработанного метода, от значе-

ний освещенностей, полученных в результате программного расчета;

- поиск математических выражений, позволяющих описать ОУ одним математическим уравнением;

- оценка влияния размера осветительного прибора на коэффициент использования светового потока ОП при помощи разработанного метода;

- апробация метода при помощи анализа светотехнического калькулятора, разработанного на основе данного метода.

За основу разработки метода расчета коэффициента использования светового потока осветительного прибора выбран метод расчета освещенности точечным методом, реализованный в программе DIALux [4]. Программа DIALux позволяет создавать ОУ различных габаритных размеров, различных коэффициентов отражения поверхностей, позволяет учитывать габаритные размеры осветительных приборов, а также рассматривать комбинированные системы освещения.

Алгоритм заключается в следующем:

- в программе DIALux создается модель, описание ОУ;

- поверхностям помещения присваиваются коэффициенты отражения, которые могут быть получены из справочной литературы в зависимости от применяемых для покрытия поверхностей материалов, например [5];

- для исключения эксплуатационных потерь светового потока, предусмотренных в программе DIALux, коэффициенту эксплуатации (уменьшению), приведенному в методе плана техобслуживания, присваивается значение «1»;

- проводится расчет освещенности;

- в результатах расчета на рассматриваемой плоскости выбираются и копируются полученные значения освещенности E_{KN} , представленные в программе DIALux в табличном виде с выбранной матрицей значений $K \cdot N$ (количество точек, на которые разбивает помещение, тем самым задается размер единицы площади помещения);

- проводится расчет единичной площади помещения по формуле

$$S_{KN} = S / (K \cdot N),$$

где S – площадь помещения;

- проводится расчет световых потоков в каждой единичной площади помещения Φ_{KN} по формуле

$$\Phi_{KN} = E_{KN} \cdot S_{KN};$$

- проводится расчет полезного светового потока Φ_0 на рассматриваемой плоскости по формуле

$$\Phi_0 = \sum \Phi_{KN};$$

- проводится расчет коэффициента использования светового потока по формуле $UF = \Phi_0 / \Phi_v$.

Оценка отклонений выполнена для следующих ОУ, отличающихся индексами помещения i [1]:

ОУ № 1: 3,4·3,4·3,0 м³ ($i = 0,77$), количество светильников – 4 шт.

ОУ № 2: 5,0·5,0·3,0 м³ ($i = 1,14$), количество светильников – 9 шт.

ОУ № 3: 10,0·10,0·3,0 м³ ($i = 2,30$), количество светильников – 36 шт.

ОУ № 4: 15,0·15,0·3,0 м³ ($i = 3,41$), количество светильников – 81 шт.

ОУ № 5: 21,8·21,8·3,0 м³ ($i = 4,95$), количество светильников – 169 шт.

Напомним, что индекс помещения i рассчитывается по известной формуле

$$i = L \cdot W / (H_M \cdot (L + W)),$$

где L – длина помещения, м; W – ширина помещения, м; H_M – высота монтажа светильников относительно рабочей плоскости, м.

Высота рабочей плоскости принята 0,8 м от пола.

За основу выбрана КСС светильника производства компании ООО «Арлайт Рус» [6] ALT-TOR-BB200SW-7W WARM WHITE (рис. 1), представленная также в виде фотометрического файла *.ies, но со следующими изменениями:

- с целью устранения отклонения, вызванного габаритными размерами светильника, габаритный размер приведен к квазиточечному источнику света размером 1·1 мм²;

- световой поток светильника программно изменен на 3000 лм. Выявлено, что программа DIALux при работе с небольшими значениями световых потоков и большими габаритными размерами помещений выводит результаты в виде десятичных чисел, знаком препинания которой является точка, что вызывает сложности при последующей математической обработке в программе Excel, принятым знаком препинания которой является запятая. По этой причине при последующем импортировании значений в программу Excel иногда возникают ошибки при замене знака препинания. Также программе DIALux при расчете освещенностей свойственно округлять значения, что также при небольших значениях светового потока приводит к дополнительным погрешностям. По этой причине для повышения точности расчета решено принудительно увеличить значение светового потока.

Измерение КСС макета светоизлучающего модуля проведено на гониофотометрической установке LabSpion [7].

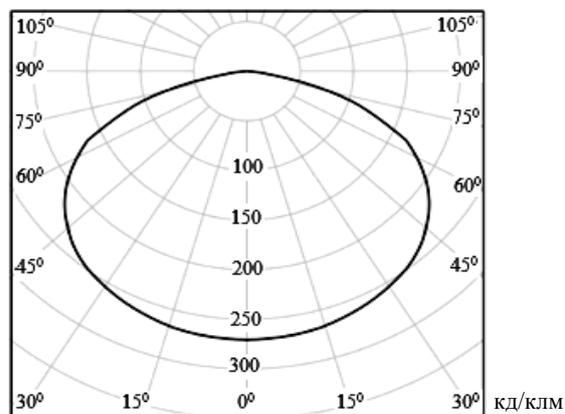


Рис. 1. КСС типа Д для квазиточечного источника света 1·1 мм² в полярной системе координат, сила света на которой приведена к световому потоку 1000 лм

Расчет отклонений выполнен при помощи сравнения средних освещенностей, полученных расчетным путем по предложенной методике и расчетом в программе DIALux. Расчет средней освещенности методом коэффициента использования выполняется по формуле

$$E_{cp} = \Phi_v \cdot UF \cdot MF / S,$$

где MF – коэффициент эксплуатации, выбранный в нашем случае 0,71 для категории помещений (офисные, жилые и учебные помещения, торговые залы), что соответствует коэффициенту запаса 1,41.

Результаты расчета и сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета				
Коэффициенты отражения стен, потолка, пола, %	UF	Расчет E_{cp} методом коэффициента использования светового потока, лк	Расчет E_{cp} при помощи программы DIALux	Отклонение, %
ОУ № 1				
10, 10, 10	0,3454	254,6	255	0,1
70, 50, 30	0,5074	374,0	374	0
70, 70, 50	0,6973	513,9	514	0
70, 70, 70	0,7467	550,3	552	0,3
ОУ № 2				
10, 10, 10	0,4773	366,0	366	0
70, 50, 30	0,6621	507,7	508	0,1
70, 70, 50	0,8756	671,4	671	0,1
70, 70, 70	0,9624	738,0	738	0
ОУ № 3				
10, 10, 10	0,6935	531,8	532	0
70, 50, 30	0,9032	692,6	693	0,1
70, 70, 50	1,1424	876,0	876	0
70, 70, 70	1,3195	1011,8	1012	0
ОУ № 4				
10, 10, 10	0,7869	603,4	603	0,1
70, 50, 30	1,0080	772,9	773	0
70, 70, 50	1,2551	962,4	962	0
70, 70, 70	1,4857	1139,2	1139	0
ОУ № 5				
10, 10, 10	0,8506	644,3	644	0
70, 50, 30	1,0801	818,1	818	0
70, 70, 50	1,3326	1009,4	1009	0
70, 70, 70	1,6093	1219	1219	0

Из табл. 1 видно, что значения E_{cp} , полученные по методу расчета коэффициента использования светового потока, практически совпали со значениями E_{cp} , выполненными в программе DIALux.

Таким образом, разработан метод расчета коэффициента использования светового потока, который позволяет с погрешностью, не превышающей $\pm 0,3\%$ от компьютерного моделирования, рассчитывать коэффициент использования светового потока.

Для поиска математических выражений, позволяющих описать ОУ одним математическим уравнением, авторами построены зависимости коэффициентов использования светового потока UF от индексов помещения i при рассматриваемых авторами коэффициентах отражения стен, потолка и пола, ко-

торые иллюстрируются на рис. 2. Зависимости UF от i аппроксимированы полиномом третьей степени, достоверность аппроксимации R^2 которых более 0,9986.

UF , коэффициентов использования светового потока

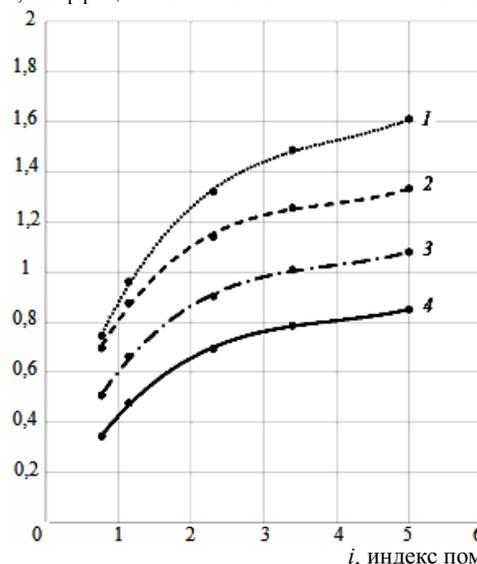


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования светового потока от индекса помещения при разных коэффициентах отражения потолка, стен, пола для КСС типа Д

Зависимость 1

$$UF = 0,0164 \cdot i^3 - 0,1967 \cdot i^2 + 0,8537 \cdot i + 0,2068.$$

Зависимость 2

$$UF = 0,0151 \cdot i^3 - 0,1747 \cdot i^2 + 0,713 \cdot i + 0,2534.$$

Зависимость 3

$$UF = 0,0126 \cdot i^3 - 0,1479 \cdot i^2 + 0,6173 \cdot i + 0,1208.$$

Зависимость 4

$$UF = 0,0105 \cdot i^3 - 0,125 \cdot i^2 + 0,5319 \cdot i + 0,01.$$

Проведены оценка отклонений и апробация метода с учетом полученных аппроксимирующих зависимостей. Результаты приведены в табл. 2.

Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что отклонения значений, полученных при помощи аппроксимирующих функций, составляют менее $\pm 2\%$, что является достаточным для практического применения метода.

Для учета влияния площади светящей поверхности по отношению к освещаемой поверхности предлагается ввести коэффициент светящей поверхности (коэффициент осветительного прибора), который определяется как отношение площади светящей поверхности осветительных приборов $S_{оп}$ к площади освещаемой поверхности помещения S .

На примере ОУ № 1 для КСС типа Д при рассматриваемых коэффициентах отражения получены зависимости коэффициента использования светового потока от отношения $S_{оп}/S$, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями, достоверность аппроксимации R^2 которых выше 0,9994:

1. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 10, 10, 10%:

$$UF = -0,0173 \cdot S_{\text{ОП}} / S + 0,3456. \quad (1)$$

2. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 70, 50, 30%:

$$UF = -0,018 \cdot S_{\text{ОП}} / S + 0,5077. \quad (2)$$

3. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 70, 70, 50%:

$$UF = -0,0187 \cdot S_{\text{ОП}} / S + 0,6975. \quad (3)$$

4. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 70, 70, 70%:

$$UF = -0,0202 \cdot S_{\text{ОП}} / S + 0,7469. \quad (4)$$

Таблица 2

Результаты расчета

Значения коэффициентов отражения поверхностей помещения: потолок, стены, пол, %	Расчет $E_{\text{ср}}$ методом коэффициента использования светового потока, лк	Расчет $E_{\text{ср}}$ при помощи программы DIALux	Отклонение метода коэффициента использования от компьютерного метода расчета, %
ОУ № 1			
10, 10, 10	259,5	255	1,8
70, 50, 30	381,1	374	1,9
70, 70, 50	523,1	514	1,8
70, 70, 70	553,9	552	0,3
ОУ № 2			
10, 10, 10	361,9	366	1,1
70, 50, 30	502	508	1,2
70, 70, 50	664,4	671	1
70, 70, 70	731,5	738	0,9
ОУ № 3			
10, 10, 10	539,3	532	1,4
70, 50, 30	702,9	693	1,4
70, 70, 50	889	876	1,5
70, 70, 70	1025,1	1012	1,3
ОУ № 4			
10, 10, 10	605,3	603	0,4
70, 50, 30	775,4	773	0,3
70, 70, 50	965,5	962	0,4
70, 70, 70	1142,0	1139	0,3
ОУ № 5			
10, 10, 10	648,3	644	0,7
70, 50, 30	823,2	818	0,6
70, 70, 50	1015,8	1009	0,7
70, 70, 70	1220,3	1219	0,1

Отклонение Δ коэффициента использования светового потока для осветительных приборов, площадь излучения которого соответствует площади освещаемой поверхности UF_1 (в данном случае $S = S_{\text{оп}}$), от коэффициента использования светового потока ОП, площадь излучения которого представляет собой точечный источник света UF_2 (в данном случае $S_{\text{оп}} = 0$), можно оценить, решив систему линейных уравнений, используя полученные линейные выражения.

После получения коэффициентов использования светового потока UF_1 , UF_2 рассчитывается отклонение по формуле

$$\Delta = (1 - UF_1 / UF_2) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Рассмотрим расчет для самого темного помещения (10, 10, 10%):

1. Уравнение (1) для случая, когда площадь осветительного прибора имеет габаритные размеры, соизмеримые с площадью освещаемой поверхности $S = S_{\text{оп}}$, принимает вид

$$UF_1 = 0,3283.$$

2. Уравнение (2) для случая, когда осветительный прибор является точечным источником света $S_{\text{оп}} = 0$, принимает вид

$$UF_2 = 0,3456.$$

3. Из формулы (5) отклонение коэффициента использования UF_1 по отношению к UF_2 соответствует

$$\Delta = 5,0\%.$$

Аналогичным способом определены отклонения Δ для ОУ с другими коэффициентами отражения:

1. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 70, 50, 30%, применяя выражение (2):

$$\Delta = 3,5\%$$

2. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 70, 70, 50%, применяя выражение (3):

$$\Delta = 2,7\%.$$

3. Для ОУ с коэффициентами отражения потолка, стен, пола, соответствующих 70, 70, 70%, применяя выражение (4):

$$\Delta = 2,7\%.$$

Таким образом, влияние габаритных размеров ОП наиболее существенно для ОУ с наименьшими коэффициентами отражения поверхностей помещения: в нашем случае 10, 10, 10%.

Также следует, что при расчете коэффициента использования светового потока осветительных приборов необходимо учитывать их габаритные размеры.

На рис. 3 представлена структурная схема измерительного оптоэлектронного комплекса для определения коэффициента использования светового потока осветительного прибора.



Рис. 3. Структурная схема измерительного оптоэлектронного комплекса коэффициента использования светового потока осветительного прибора

Измерительный комплекс позволяет провести на месте объекта выбор наиболее эффективной КСС осветительного прибора для конкретного помещения и исходя из этого провести оценку количества осветительных приборов для данного помещения при заданном уровне освещенности.

Разработанная методика и выявленные аппроксимирующие зависимости легли в основу для разработки светотехнического калькулятора, оценка от-

клонений и их сравнение с аналогами приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что калькулятор, выполненный на базе разработанного нами метода, имеет максимальное отклонение 5,6%. В отличие от аналогов, представленных на отечественных сайтах, отклонение расчета освещенности которых в некоторых случаях превышает 100%, предложенный калькулятор дает существенно более точные результаты.

Таблица 3

Оценка светотехнических калькуляторов

Световой поток одного светильника, лм	Габаритные размеры помещения, $L \cdot W \cdot H$, м ³	i	Значения коэффициентов отражения поверхностей помещения: потолок, стены, пол, %	$E_{\text{ср}}$, задаваемая калькулятором	Количество световых точек, предложенное калькулятором	Расчет $E_{\text{ср}}$ при помощи программы DIALux, лк	Отклонение, %
Калькулятор № 1							
816	1,5·1,5·3	0,34	0, 0, 0	300	7	126	138,1
			70, 50, 20	300	4	169	77,5
			80, 80, 30	300	2	211	42,2
	3,4·3,4·3	0,77	0, 0, 0	300	24	263	14,1
			70, 50, 20	300	14	298	0,7
			80, 80, 30	300	8	303	1,0
	21,8·21,8·3	4,95	0, 0, 0	300	344	271	10,7
			70, 50, 20	300	251	280	7,1
			80, 80, 30	300	195	276	8,7
Калькулятор № 2							
1300	1,5·1,5·3	0,34	50, 30, 10	300	2	145	106,9
			70, 50, 20	300	1	99	203,0
	3,4·3,4·3	0,77	50, 30, 10	300	8	280	7,1
			70, 50, 20	300	7	305	1,6
	21,8·21,8·3	4,95	50, 30, 10	300	238	419	28,4
			70, 50, 20	300	218	431	30,4
Калькулятор, созданный по разработанному нами методу							
1200	1,5·1,5·3	0,34	30, 10, 10	300	7	300	0,0
			70, 50, 30	300	4	299	0,3
	3,4·3,4·3	0,77	30, 10, 10	300	11	284	5,6
			70, 50, 30	300	8	303	1,0
	21,8·21,8·3	4,95	30, 10, 10	300	198	307	2,3
			70, 50, 30	300	146	284	5,6

Выводы

1. Разработанный метод позволяет с погрешностью $\pm 0,3\%$ рассчитать коэффициент использования светового потока.

2. Полученные аналитические выражения с погрешностью не более 2% позволяют рассчитывать зависимости коэффициента использования светового потока от индекса помещения при разных коэффициентах отражения стен, потолка и пола.

3. При расчете коэффициента использования светового потока необходимо учитывать значение коэффициента осветительных приборов, предложенного нами для оценки влияния габаритных размеров осветительного прибора, отклонение которого максимально для ОУ с наименьшими коэффициентами отражения.

4. Предложенная структурная схема измерительного оптоэлектронного комплекса позволяет оперативно провести расчет коэффициента использования светового потока, что необходимо для оценки эффективности КСС осветительного прибора для

данного помещения с определением количества осветительных приборов при заданном уровне освещенности.

5. Полученные отклонения значений освещенности при расчете в созданном светотехническом калькуляторе на основе разработанного метода не превышают 5,6% от значений, полученных в программе DIALux.

6. Предложенный метод может быть использован для оперативных и точных энергоаудиторских обследований осветительных установок.

Литература

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.

2. Пособие к МГСН 2.06–99. Расчет и проектирование искусственного освещения помещений общественных зданий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opengost.ru>, свободный (дата обращения: 13.06.2017).

3. Luminaire efficiency factor system for general lighting // Axel Stockmar // Right Light (Nice, France). – 2002. – № 5. – P. 311–318.

4. Официальный сайт DIALux [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dial.de/> (дата обращения: 17.04.2017).

5. СП 23-102–2003. Естественное освещение жилых и общественных зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 83 с.

6. Официальный сайт компании ООО «Арлайт Рус» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arlight.ru>, свободный (дата обращения: 17.04.2017).

7. Официальный сайт компании Viso Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.visosystems.com>, свободный (дата обращения: 17.04.2017).

Гончаров Александр Дмитриевич

Вед. инж. компании ООО «Арлайт Рус», Москва

Тел.: +7-916-924-57-50

Эл. почта: Alexander_G_@mail.ru

Туев Василий Иванович

Д-р техн. наук, профессор, директор

НИИ светодиодных технологий (НИИ СТ) ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 90-01-46

Эл. почта: tvi_retem@main.tusur.ru

Goncharov A.D., Tuev V.I

Universal method to calculate the Utilization Factor for luminous flux of lighting devices

A universal method to calculate the utilization factor of luminous flux and to evaluate the efficiency of light distribution of lighting devices both for indoor and outdoor lighting has been developed. The analytical expressions for the dependence of light flux utilization factor on room index are obtained. A block diagram of the measuring optoelectronic complex is proposed that calculates this factor when examining lighting installations. A lighting calculator has been developed on the basis of the developed method.

Keywords: utilization factor of luminous flux, light intensity curve, optoelectronic devices.