

Выбор расстояния фотометрирования при измерениях силы света

Т.В. Широких

Смоленский филиал «Национального исследовательского университета «МЭИ»

Аннотация. При измерении силы света размеры источника света должны быть малы по сравнению с расстоянием фотометрирования. В этом случае выполняется закон квадратов расстояния, который можно применять на практике и получать высокую точность измерений, если расстояние фотометрирования превышает наибольший размер источника света не менее чем в 10 раз. Для источников света с конечными размерами при малых расстояниях до освещаемой поверхности в этот закон необходимо вводить поправки. В настоящей работе приводятся результаты расчетов погрешностей при использовании закона квадратов расстояния для источников света конечных размеров различных форм и различных светораспределений.

Ключевые слова: закон квадратов расстояния, сила света, погрешность измерений, расстояние фотометрирования.

Известно, что при измерении силы света размеры источника света должны быть малы по сравнению с расстоянием фотометрирования. В этом случае выполняется закон квадратов расстояния [1-3]:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\varphi,$$

где E – освещенность поверхности, I - сила света источника света, φ - угол между направлением излучения и нормалью к освещаемой поверхности.

Закон квадратов расстояния можно применять на практике и получать высокую точность измерений, если расстояние фотометрирования превышает наибольший размер источника не менее чем в 10 раз.

Таким образом, закон квадратов расстояния справедлив для точечных источников света, которых практически не существует. Для источников света с конечными размерами при малых расстояниях от источника до освещаемой поверхности в этот закон необходимо вводить поправки. Это объясняется тем, что при реальном источнике света лучи от различных его точек падают на освещаемую поверхность под различными углами [4].

В качестве примера рассмотрим алгоритм расчета освещенности от источника света в виде кольца.

1. Выделим на кольце участок da и рассчитаем освещенность от этого участка в т.А по формуле:

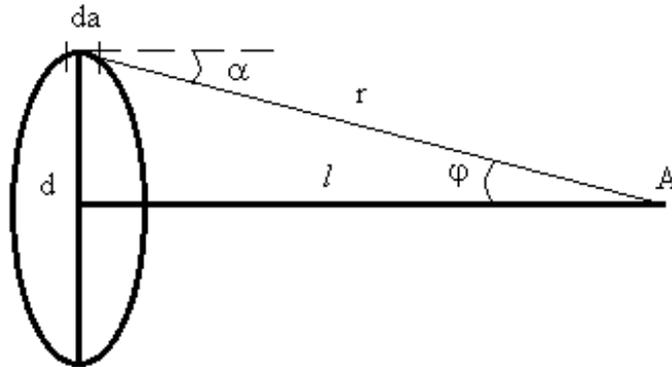


Рис. 1 К расчету освещенности от тонкого кольца в т.А

$$dE = \frac{I_{\alpha}}{r^2} \cos \varphi \quad (1)$$

где I_{α} - сила света участка da в направлении т.А, r – расстояние от рассматриваемого участка до исследуемой точки.

2. Учитывая, что сила света связана с яркостью L соотношением $L da \cos \alpha$, получим:

$$dE = \frac{L da \cos \alpha}{r^2} \cos \varphi \quad (2)$$

где $\cos \alpha = \cos \varphi = \frac{l}{r}$; $r = \sqrt{l^2 + \frac{d^2}{4}}$ (3)

3. Подставив выражения (3) в формулу (2), получим:

$$dE = \frac{L da l^2}{\left(l^2 + \frac{d^2}{4}\right)^2} \quad (4)$$

4. Проинтегрировав выражение (4) по всей длине кольца, получим расчетную формулу освещенности в заданной точке:

$$E = \oint dE = \frac{L \pi d l^2}{\left(l^2 + \frac{d^2}{4}\right)^2} \quad (5)$$

Аналогичным образом получены формулы для расчета освещенности в исследуемой точке пространства от плоского кольца, тороида, диска с равномерным распределением яркости и диска с неравномерным распределением яркости.

Если излучение падает нормально на освещаемую поверхность, т.е. $\cos\varphi = 1$, то из выражения $E = \frac{I}{l^2}$ следует, что:

$$\frac{dE}{E} = -\frac{dl}{l}$$

т.е. погрешность в определении освещенности по закону квадратов расстояния зависит от погрешности измерения расстояния фотометрирования [5-7].

Например, чтобы погрешность измерения освещенности E не превышала 0,1%, относительная погрешность в измерении расстояния l не должна превышать 0,2%.

Однако не всегда возможно обеспечить 10-кратное превышение расстояния фотометрирования наибольшего размера источника света (размеры источника света велики, ограничено расстояние для измерений размерами помещения и т.п.). Поэтому критерием выбора расстояния фотометрирования является заданная погрешность измерений.

Например, при удалении от равномерно светящего диска на расстояние, в 10 раз превышающем диаметр диска, погрешность измерения силы света составляет 0,25%; при удалении в 5 раз - погрешность 1% [8-10].

Однако проведенные исследования показали (см. таблицу), что погрешность закона квадратов расстояния на указанном 5-кратном расстоянии от равноярких тонкого тороида составляет 1,5%, плоского и тонкого колец - 2%, для диска с неравномерным распределением яркости:

$$L_{\alpha} = L_0 \cos^n \alpha$$

погрешность возрастает с увеличением n от 1% (при $n = 0$) до 28% (при $n = 100$) (таблица 1).

Таблица 1

К выбору расстояния фотометрирования (погрешность указана в %)

Форма источника света	l/d						
	3	5	7	10	20	50	100
1. Тороид	4,2	1,5	0,77	0,38	0,09	-	-
2. Плоское кольцо	5,6	2,0	1,0	0,50	0,12	-	-
3. Тонкое кольцо	5,3	2,0	1,0	0,5	0,12	-	-
4. Диск с равномерным распределением яркости	2,7	1,0	0,5	0,2	0,06	-	-
5. Диск с неравномерным распределением яркости, $n = 0$	2,8	1,0	0,51	0,25	0,06	-	-
6. Диск с неравномерным распределением яркости, $n = 3$	4,9	1,8	0,89	0,44	0,11	-	-
7. Диск с неравномерным распределением яркости, $n = 10$	9,9	3,5	1,8	0,88	0,22	-	-
8. Диск с неравномерным распределением яркости, $n = 30$	25,2	8,7	4,4	2,1	0,53	0,08	-
9. Диск с неравномерным распределением яркости $n = 100$	-	28,1	13,8	6,6	1,6	0,26	0,06

где l – расстояние фотометрирования, d – диаметр источника света.

Следует отметить, что зависимость погрешности от отношения l/d имеет нелинейный характер для всех форм источников света (рис.2).

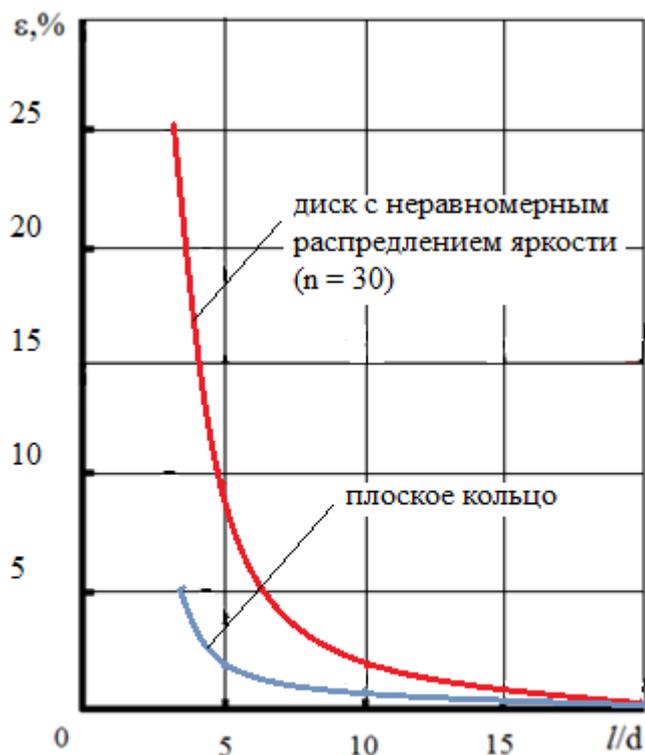


Рис.2 Погрешность закона квадратов расстояния

Решать светотехнические задачи приходится инженерам многих направлений, поэтому данная информация может быть полезна многим специалистам, особенно тем, кто занимается проектированием световых и оптических приборов.

Литература

1. Мешков В.В. Основы светотехники Учеб. пособие для вузов. Ч.1 - 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1979. - 368 с.
2. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
3. Walsh J.W.T. Photometry.-London: Constable &Co, Ltd, 1965. - 544 p.
4. Костоев А.Т., Огородов Д.В., Данько Д.И. Исследование геометрических факторов зрительной иллюзии, возникающей при оценке расстояний между краями объектов// Инженерный вестник Дона, 2022, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7770

5. Фомин А.Г. Энциклопедия света, т.1. – Гармония света. – 2006.- 184 с.
6. Мухамеджанов С., Ляховенко Ю.А., Мельников Т.Ю., Чебунин К.О., Попов И.Ю. Исследование влияния света на работу сенсоров машинного зрения // Инженерный вестник Дона, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8814
7. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 254с.
8. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 112 с.
9. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Trans. Image Process. 2004. V. 13. № 4. P. 600–612.
10. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 304 с.

References

1. Meshkov V.V. Osnovy svetotekhniki [Fundamentals of lighting technology] Ucheb. posobie dlja vuzov. Ch.1, 2-e izd., pererab. M.: Jenergija, 1979. 368 p.
 2. Gurevich M.M. Fotometrija (teorija, metody i pribory) [Photometry (theory, methods, instruments)]. L.: Jenergoatomizdat, 1983. 272 p.
 3. Walsh J.W.T. Photometry. London: Constable &Co, Ltd, 1965. 544 p.
 4. Kostoev A.T., Ogorodov D.V., Dan'ko D.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7770
 5. Fomin A.G. Jenciklopedija sveta [Encyclopedia of Light], t.1. Garmonija sveta. 2006. 184 p.
 6. Muhamedzhanov S., Ljahovenko Ju.A., Mel'nikov T.Ju., Chebunin K.O., Popov I.Ju Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8814
-



7. Jepshtejn M.I. Izmerenija opticheskogo izlucheniya v jelektronike [Measurement of optical radiation in electronics]. M.: Jenergoatomizdat, 1990. 254p.
8. Zajdel' A.N. Oshibki izmerenij fizicheskikh velichin [Errors in measuring physical quantities]. Sankt-Peterburg: Lan', 2022. 112 p.
9. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. IEEE Trans. Image Process. 2004. V. 13. № 4. pp. 600–612.
10. Kirillovskij V.K. Sovremennye opticheskie issledovanija i izmerenija [Modern optical research and measurements]. Sankt-Peterburg: Lan', 2022, 304 p.

Дата поступления: 26.03.2025

Дата публикации: 25.05.2025