
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 628.946.22
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-640-649

МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ЗАГРАДИТЕЛЬНОГО ОГНЯ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Н. Н. БОГДАНОВ, Д. Д. ЖДАНОВ, И. С. ПОТЕМИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nnbogdanov@itmo.ru*

Рассматривается проблема проектирования оптической системы с элементами свободной формы. Предложена модификация метода соответствия лучей для задачи проектирования оптического элемента для заградительного огня малой интенсивности. Описан алгоритм расчета оптических элементов для такого рода устройств, представлены результаты расчета и виртуального прототипирования устройства.

Ключевые слова: *неизображающая оптика, поверхности свободной формы, заградительные огни, светотехника, оптическое моделирование*

Введение. В темное время суток для обозначения гражданских и промышленных зданий и других высотных конструкций в зонах полета воздушного транспорта применяются специальные светильники — заградительные огни. Существуют заградительные огни нескольких видов: высокой интенсивности, средней интенсивности и малой интенсивности. Заградительные огни малой интенсивности должны быть источниками постоянного излучения красного цвета с распределением силы света, определяемым в авиационных правилах [1, ч. 170]. В настоящее время в качестве источника излучения для заградительных огней применяются светодиоды, обладающие длительным сроком эксплуатации, низким энергопотреблением и высокой светоотдачей. Диаграмма углового распределения силы света обычного светодиода является ламбертовской, что не всегда подходит для формирования заданных условий освещения. В частности, при проектировании заградительных огней малой интенсивности весьма актуальным является обеспечение заданного углового распределения светового потока, излучаемого светодиодом. Данная проблема решается путем использования специально рассчитанной оптики.

Проектирование оптических элементов для светодиодных источников света — одно из важнейших направлений светотехники. Для формирования требуемого углового распределения светового излучения в пространстве используются оптические поверхности свободной формы [2]. Общие вопросы проектирования вторичной оптики, в том числе с использованием поверхностей свободной формы, рассмотрены в работах [3—8]. В последнее время рядом исследователей были предприняты попытки адаптировать эти общие методы для расчета оптических элементов светосигнальных огней. В частности, в работе [9] описывается метод проектирования вторичной оптики для аэродромного рулежного огня с элементами поверхности свободной формы и коллимирующей линзой полного внутреннего отражения. В данном случае в системе применяется один источник света, расположенный по центру конструкции. Рас-

считанный оптический элемент является осесимметричной фигурой вращения. Авторам для построения поверхности свободной формы удалось избежать решения сложных дифференциальных уравнений за счет применения простого геометрического анализа и метода конечных разностей. Расчеты выполнялись для точечного источника, но моделирование проводилось для конкретного светодиода с заданными габаритными размерами. К недостаткам можно отнести то, что конструкция оптического элемента является составной и технологически сложной для изготовления, а световой поток от одного светодиода не может обеспечить фотометрические характеристики заградительного огня, поэтому данный метод неприменим для расчета оптического элемента для заградительного огня. В работе [10] описывается метод проектирования оптической системы центрального посадочного огня для взлетно-посадочной полосы. Система, состоящая из линзы с полным внутренним отражением и призмы, разработана на основе геометрического анализа хода лучей. Линза необходима для создания узкого пучка света, а призма отклоняет его на необходимый угол относительно горизонта. Рассчитанная линза является осесимметричной фигурой вращения, и полученное распределение также является осесимметричным. Расчеты выполнялись для идеального точечного источника, а моделирование проводилось для протяженного источника. Однако данная конструкция не предполагает кругового излучения, оптический элемент рассчитывается для одного светодиода. Несмотря на возможность применения нескольких светодиодов с такими линзами, размещенными по кругу, в областях между ними возможен провал в распределении силы света.

Одним из самых простых в реализации методов проектирования оптических поверхностей свободной формы является метод соответствия входных и выходных лучей [11]. Этот метод используется для решения задач проектирования вторичной оптики для равномерного освещения, где целевой функцией проектирования является либо равномерная освещенность поверхности заданной формы, либо кривая силы света (КСС) [12—14]. Метод соответствия лучей эффективен при работе как с точечными источниками света, так и с протяженными. В основу метода положен принцип сегментации фотометрического тела источника света и требуемого фотометрического тела на равное количество телесных углов с равными потоками. Для каждого сегмента определяется направление луча и проверяется соответствие между входными и выходными лучами, т. е. определяется, как входной луч должен изменить направление.

Цель настоящей статьи — модификация метода соответствия лучей для проектирования оптических элементов светосигнального оборудования на примере заградительных огней малой интенсивности. Модификация заключается в приведении диаграммы распределения силы света источника излучения и выходной диаграммы распределения силы света устройства в целом к единой сферической системе координат.

Требования к распределению выходного излучения устройства заградительного огня. Конструкция устройства заградительного огня должна обеспечивать круговое распределение излучения. Согласно [1, ч. 170, п. 6.1.9] сила света огней в пределах углов возвышения от 6 до 10° должна составлять не менее 10 кд для огней типа А и не менее 32 кд для огней типа В. Также следует предусматривать силу света огней не менее 4 кд в пределах углов от -6 до $+50^\circ$ в вертикальной плоскости.

Сферическая система координат, в которой согласно авиационным правилам задается угловое распределение силы света, представлена на рис. 1. В такой системе координат плоскость XOY параллельна горизонтальной плоскости, а перпендикулярная ей полярная ось OZ направлена в зенит. Угол возвышения θ измеряется в вертикальной плоскости от горизонта к вертикали, полярный угол α — в вертикальной плоскости от вертикали к плоскости горизонта, азимутальный угол φ — в плоскости горизонта от направления нулевого азимута ($\varphi=0$) до $\varphi = 2\pi$.

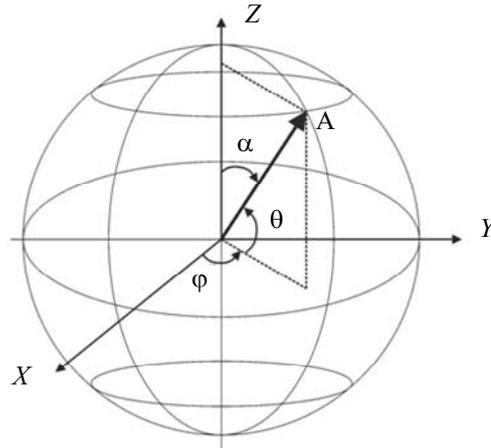


Рис. 1

На рис. 2 представлен график заданного распределения силы света (I) в вертикальной плоскости, удовлетворяющего авиационным правилам.

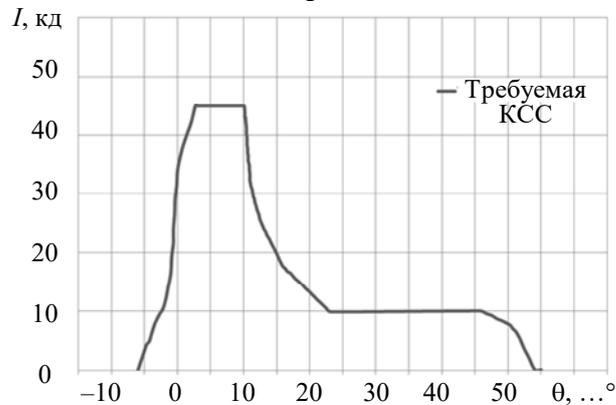


Рис. 2

Исходная схема оптического элемента. Предполагаемая схема проектируемого оптического элемента включает две рабочие поверхности: первая — коническая, вторая — поверхность свободной формы, которая будет рассчитана (рис. 3). Источники света (ИС) размещаются по окружности некоторого радиуса, повернуты на определенный угол и смещены относительно вертикальной оси. Разработчик самостоятельно определяет количество источников света, от 6 до 12, радиус окружности, высоту расположения источников света, а также расположение первой поверхности, включая ее наклон. Данные параметры определяются исходя из технологических возможностей и фотометрических характеристик источников света, направления максимальной интенсивности излучения, а также требований к габаритным размерам источников.

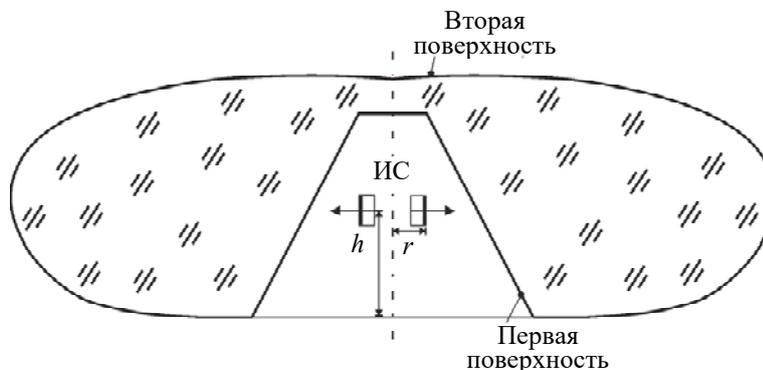


Рис. 3

Модифицированный метод соответствия лучей. Светодиоды представляют собой ламбертовские излучатели. Сила света таких источников пропорциональна косинусу угла

между нормалью к излучающей поверхности и направлением излучения. Световой поток в диапазоне углов φ_1 — φ_2 , α_1 — α_2 , излучаемый таким источником, вычисляется по формуле [15]

$$\Phi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I(\alpha) \sin\alpha \cdot d\alpha, \tag{1}$$

где $I(\alpha) = I_0 \cos \alpha$ — сила света, I_0 — сила света в направлении ($\alpha = 0$), перпендикулярном к излучающей поверхности светодиода; азимутальный угол φ в случае полного светового потока изменяется в диапазоне $[0, 2\pi]$, полярный угол α — в диапазоне $[0, \pi/2]$.

Система координат, используемая в выражении (1), представлена на рис. 4, когда излучающая поверхность источника параллельна горизонтальной плоскости, а полярная ось направлена в зенит. При таком расположении максимальное значение силы света I_0 будет соответствовать вертикальному направлению.

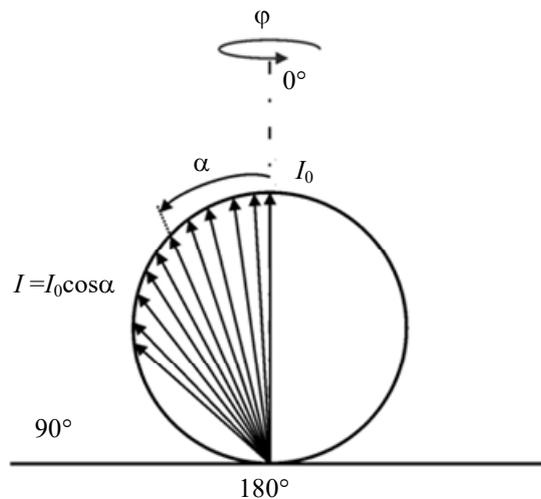


Рис. 4

Однако, согласно требованиям к распределению выходного излучения устройства заградительного огня, максимальная сила света должна соответствовать направлениям, лежащим в непосредственной близости к плоскости горизонта. Для обеспечения этих требований наиболее подходящее расположение источников света — вертикальная ориентация, как показано на рис. 3 (стрелки указывают направление, соответствующее максимальной силе света I_0). Но при такой ориентации ось вращения КСС по углу φ источника света перпендикулярна оси вращения КСС по углу φ' устройства заградительного огня в целом, как показано на рис. 5.

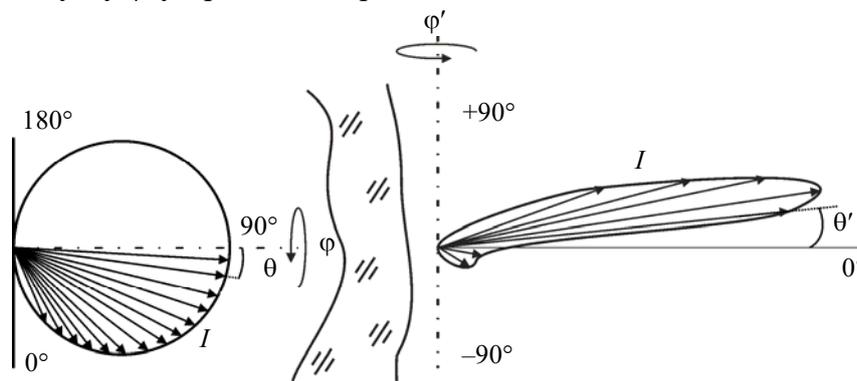


Рис. 5

Для упрощения вычислений и исключения ошибок, связанных с преобразованием систем координат, необходимо изменить ориентацию оси вращения КСС источника света таким образом, чтобы ее направление совпадало с осью вращения КСС выходного излучения, а углы θ отсчитывать от плоскости горизонта, при этом направление излучения в плоскости

горизонта будет соответствовать углу $\theta = 0^\circ$, в направлении зенита — $\theta = +90^\circ$, в надире — $\theta = -90^\circ$ (рис. 6).

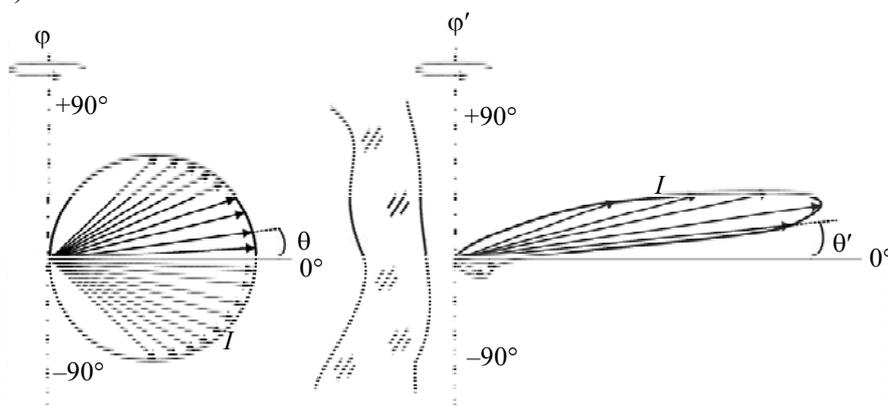


Рис. 6

В результате модификации системы координат источника формула (1) для вычисления светового потока в заданном диапазоне углов примет следующий вид:

$$\Phi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi \cdot d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta) \cos \theta \cdot d\theta, \quad (2)$$

где $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ — сила света; азимутальный угол φ в случае полного светового потока изменяется в диапазоне $[-\pi/2, +\pi/2]$, угол возвышения θ — в диапазоне $[-\pi/2, +\pi/2]$.

Очевидно, что один источник света при таком расположении в пространстве не излучает свет на 360° , поэтому требуется несколько источников. В данной работе ограничимся осесимметричной формой профиля линзы относительно вертикальной оси как более технологичной.

Сегментация фотометрического тела источника света и требуемого фотометрического тела. Далее необходимо выполнить сегментацию фотометрических тел источника света и устройства в целом. Равные световые потоки Φ_i источника света определяются в соответствии со следующими выражениями, из которых затем определяются телесные углы:

$$\Phi_i = \frac{\Phi}{N}; \quad (3)$$

$$\Phi_i = 2 \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta) \cos \theta \cdot d\theta, \quad (4)$$

где N — количество элементарных световых потоков; θ_i и θ_{i+1} — плоские углы, развернутые на полуокружность, что определяет телесный угол.

Задача по определению телесных углов не решается аналитически, только численно. Алгоритм сводится к тому, что весь диапазон углов θ разделяется на N частей и определяется $d\theta$. При $i=0$ принимается граничное значение θ , шаг за шагом вычисляется $d\Phi$, значение которого постепенно увеличивается и сравнивается со значением Φ_i , если значение $d\Phi$ близко к искомому, в пределах заданной погрешности, значение угла θ записывается, и цикл продолжается до тех пор, пока не будут определены значения углов для всех N частей от суммарного потока Φ .

Световой поток для требуемого фотометрического тела определяется как

$$\Phi' = \int_{\varphi'_1}^{\varphi'_2} d\varphi \int_{\theta'_1}^{\theta'_2} I(\theta) \cos \theta \cdot d\theta, \quad (5)$$

где $I(\theta)$ — сила света при определенном угле; угол φ изменяется в диапазоне $[0, 2\pi]$, угол θ — в диапазоне $[-\pi/2, +\pi/2]$.

Вследствие того, что источник света излучает в диапазоне $\varphi \in [-\pi/2, +\pi/2]$, диапазон φ для требуемой КСС необходимо изменить в зависимости от общего количества источников и их пространственного расположения. Например, если в устройстве будет применяться 6 источников света, повернутых друг относительно друга на угол $\pi/3$, то диапазон для φ будет составлять $[-\pi/3, +\pi/3]$.

Следующий шаг аналогичен алгоритму сегментации фотометрического тела источника света. Определяются углы, в которых излучаются равные потоки Φ'_i устройства при этом количество потоков N такое же, как и в первом случае; Φ'_i определяется следующим образом:

$$\Phi'_i = \frac{\Phi'}{N}, \tag{6}$$

$$\Phi'_i = \int_{\varphi'_1}^{\varphi'_2} d\varphi \int_{\theta'_i}^{\theta'_{i+1}} I(\theta) \cos\theta \cdot d\theta. \tag{7}$$

Численно решая выражение (7), находим совокупность углов для N частей от суммарного потока Φ'_i .

В результате формируются два массива лучей, входных и выходных, равных по количеству. Каждый входной луч соответствует углу θ_i , а выходной — углу θ'_i .

Задача следующего этапа — построение поверхности свободной формы, обеспечивающей заданное распределение входных и выходных лучей.

Построение поверхности свободной формы. Оптический путь через две преломляющие поверхности представлен на рис. 7.

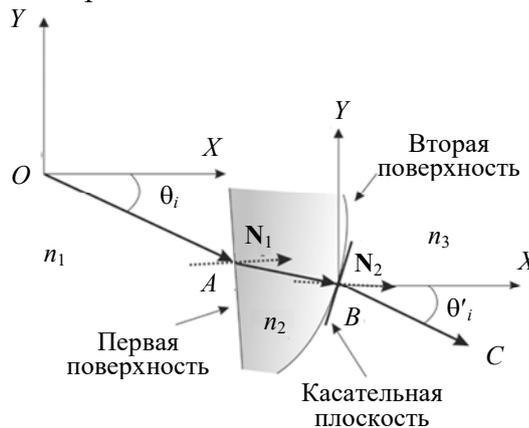


Рис. 7

Свет, излучаемый источником, преломляется дважды. Первая поверхность преломляет падающий луч OA (с углом падения θ) в луч AB . Вторая поверхность преломляет луч AB в луч BC (θ'). В соответствии с законом преломления лучи OA , AB , BC должны удовлетворять уравнениям:

$$n_1 \frac{\mathbf{OA}}{|\mathbf{OA}|} \cdot \mathbf{N}_1 = n_2 \frac{\mathbf{AB}}{|\mathbf{AB}|} \cdot \mathbf{N}_1; \tag{8}$$

$$n_2 \frac{\mathbf{AB}}{|\mathbf{AB}|} \cdot \mathbf{N}_2 = n_3 \frac{\mathbf{BC}}{|\mathbf{BC}|} \cdot \mathbf{N}_2, \tag{9}$$

где $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2$ — векторы нормали к первой и второй поверхностям; $n_1, n_3 = 1$ — показатель преломления воздуха; n_2 — показатель преломления линзы.

Сначала решается уравнение (8) и определяется направление луча AB , а затем решается уравнение (9), из которого определяется нормаль \mathbf{N}_2 к поверхности.

Схема вычисления координат точек профиля второй поверхности представлена на рис. 8. Предварительно назначается координата источника света O , определяется точка A_0 на

конической поверхности для граничного луча и назначается начальная точка B_0 для поверхности свободной формы. В точках A_0 и B_0 нормали известны, они перпендикулярны поверхности конуса. Координаты следующей точки B_1 вычисляются путем нахождения пересечения луча A_1B_1 и касательной $k_0—k_0$ в предыдущей точке B_0 . Вектор нормали в точке B_1 вычисляется из уравнения (9). Третья точка B_2 находится путем пересечения луча A_2B_2 и касательной $k_1—k_1$ в точке B_1 . Повторяя процесс, можно вычислить координаты остальных точек, пока θ_i не достигнет граничного значения. Таким образом определяются все точки профиля поверхности свободной формы.

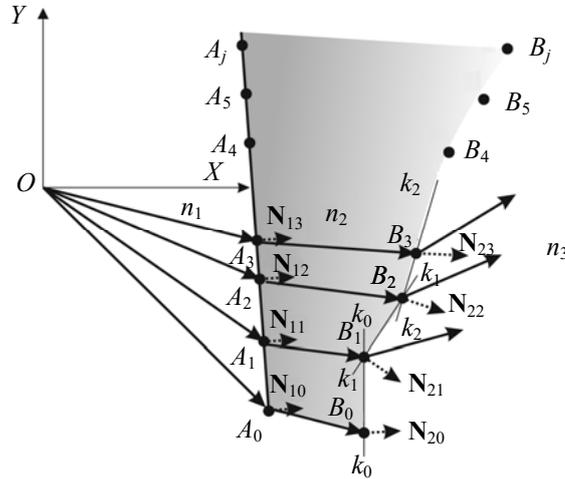


Рис. 8

Реализация метода. Пример 1. В соответствии с разработанным методом была реализована программа на языке программирования Python, с помощью которой был рассчитан оптический элемент. В расчете использовался точечный источник света. Диапазон углов $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ разделен на $N = 200$ частей, соответствующих равным световым потокам. На рис. 9 представлены габаритные размеры сечения линзы, расположение источников света, вид сверху и трехмерный вид.

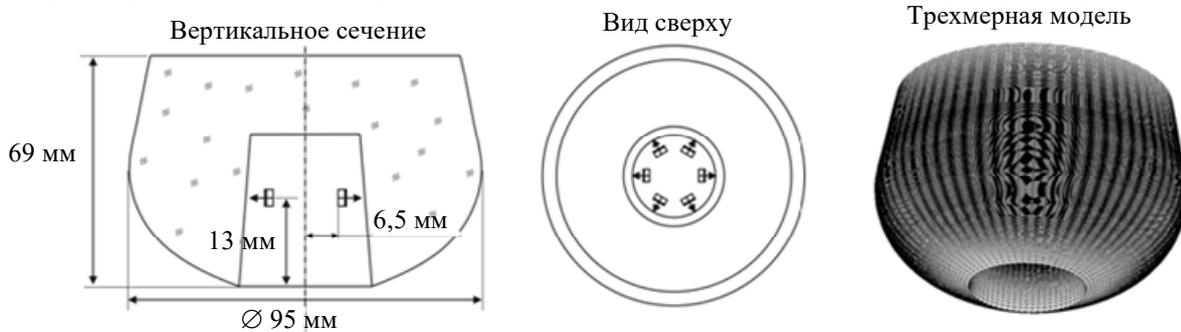


Рис. 9

Угол конуса входной поверхности рассчитываемого оптического элемента задается исходя из требуемого направления максимальной силы света устройства.

Рассчитанный профиль каждой поверхности представляет собой таблицу с координатами точек. Геометрия поверхностей линзы строится с использованием комплекса программ оптического моделирования Lumisert [16] с помощью алгоритма, который формирует полигональную сетку поверхности путем вращения точек профиля по кругу. В модели использовалось 6 точечных источников света с ламбертовской диаграммой распределения силы света. Диаграммы ориентированы таким образом, что угол между направлениями с максимальной силой света соседних источников составлял 60° . Световой поток каждого источника равен 30 лм.

Результаты моделирования распределения силы света устройством заградительного огня с рассчитанным оптическим элементом и требуемого распределения силы света в вертикальном сечении представлены на рис. 10.

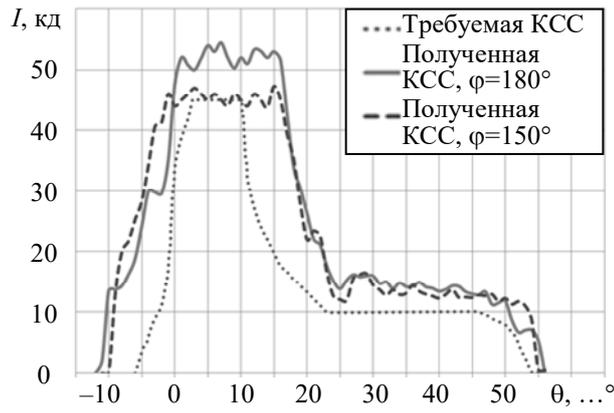


Рис. 10

Пример 2. В данном примере точечные источники света были заменены на источники конечного размера, а именно круги диаметром 3,2 мм, что соответствует светодиодам Samsung LH351В [17]. В этом примере используется та же линза, которая была рассчитана в примере с точечным источником света.

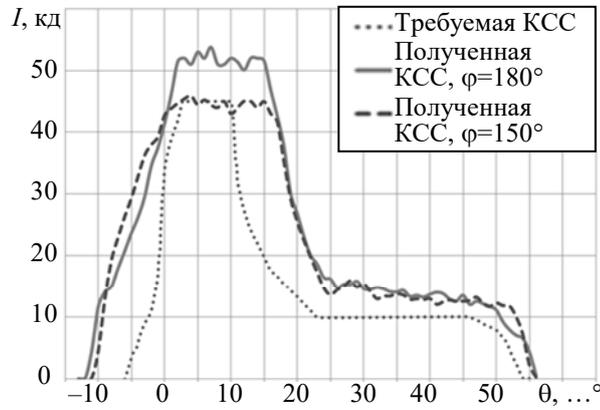


Рис. 11

Как видно из рис. 11, КСС рассчитанной линзы близка по форме и абсолютным значениям к требуемой КСС и в то же время полностью соответствует авиационным правилам. Поэтому данный результат можно считать удовлетворительным для случая протяженного источника света без последующей оптимизации.

Графики распределения силы света в горизонтальных сечениях ($\theta = 5^\circ$) показаны на рис. 12. Несмотря на полученную неравномерность силы света, требуемый уровень обеспечен как согласно авиационным правилам (32 кд), так и согласно требуемой КСС (45 кд).

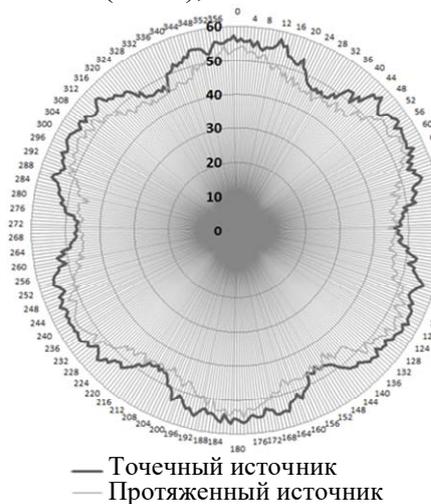


Рис. 12

Заключение. В работе предложено решение, позволяющее модифицировать метод соответствия входных и выходных лучей для расчета оптического элемента для заградительного огня малой интенсивности путем приведения КСС источника света и конструкции в целом к единой сферической системе координат. Оптический элемент представляет собой осесимметричную фигуру с внутренней конической поверхностью и внешней поверхностью свободной формы. Результаты виртуального прототипирования рассчитанного оптического элемента с источниками света конечных размеров, соответствующих реальному светодиоду, полностью удовлетворяют авиационным правилам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные правила Ч. 170. Т. II. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс. М., 2015. С. 111—112.
2. *Thompson K. P., Benitez P., Rolland J. P.* Freeform optical surfaces: Report from OSA's first incubator meeting // Optics and Photonics News. 2012. Vol. 23, N 9. P. 32—37.
3. *Wang K. et al.* Freeform Optics for LED Packages and Applications. John Wiley & Sons, 2017.
4. *Winston R. et al.* Nonimaging Optics. Elsevier, 2005.
5. *Chaves J.* Introduction to Nonimaging Optics. CRC press, 2017.
6. *Koshel R. J. (ed.)*. Illumination Engineering: Design with Nonimaging Optics. John Wiley & Sons, 2012.
7. *Gimenez-Benitez P. et al.* Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions // Optical Engineering. 2004. Vol. 43, N 7. P. 1489—1503.
8. *Dross O. et al.* Review of SMS design methods and real world applications // Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems: Proc. SPIE. 2004. Vol. 5529. P. 35—47.
9. *Xu C. Y., Cheng H. B.* A free-form side-emitting lens for airfield lighting // Lighting Research & Technology. 2018. Vol. 50, N 6. P. 937—951.
10. *Cheng H. et al.* Design of compact LED free-form optical system for aeronautical illumination // Appl. Optics. 2015. Vol. 54, N 25. P. 7632—7639.
11. *Wang K. et al.* New reversing design method for LED uniform illumination // Optics Express. 2011. Vol. 19, N 104. P. A830—A840.
12. *Parkyn W. A.* Segmented illumination lenses for step lighting and wall washing // Current Developments in Optical Design and Optical Engineering VIII: Proc. SPIE. 1999. Vol. 3779. P. 363—370.
13. *Wang L., Qian K., Luo Y.* Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance // Appl. Optics. 2007. Vol. 46, N 18. P. 3716—3723.
14. *Ding Y. et al.* Freeform LED lens for uniform illumination // Optics Express. 2008. Vol. 16, N 17. P. 12958—12966.
15. *Ландсберг Г. С.* Оптика. М.: Наука, 1976.
16. Hybrid Light Simulation Software Lumicept [Электронный ресурс]: <<https://integra.jp/en/products/lumicept>>, 10.03.2020.
17. Samsung LEDs [Электронный ресурс]: <<https://www.samsung.com/led/lighting/high-power-leds/3535-leds/lh351b/>>, 10.03.2020.

Сведения об авторах

- Николай Николаевич Богданов** — Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; младший научный сотрудник; E-mail: nnbogdanov@itmo.ru
- Дмитрий Дмитриевич Жданов** — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: ddzhdanov@mail.ru
- Игорь Станиславович Потемин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: ipotemin@yandex.ru

Поступила в редакцию
13.03.2020 г.

Ссылка для цитирования: Богданов Н. Н., Жданов Д. Д., Потемин И. С. Метод расчета оптического элемента для заградительного огня малой интенсивности // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 640—649.

METHOD FOR CALCULATING OPTICAL ELEMENT FOR AVIATION OBSTRUCTION LIGHTS OF LOW INTENSITY

N. N. Bogdanov, D. D. Zhdanov, I. S. Potemin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: nnbogdanov@itmo.ru

The problem of designing optical system with free-form elements is considered. A modification of the light energy mapping method for design of optical system for aviation obstruction lights of low intensity is proposed. An algorithm for calculating optical elements for such devices is described. Results of calculation and virtual prototyping of the device, carried out according to the proposed method, are presented.

Keywords: non-imaging optics, free-form surfaces, obstruction light, lighting engineering, optical simulations

REFERENCES

1. *Aviatsionnyye pravila Ch. 170. T. II. Sertifikatsiya oborudovaniya aerodromov i vozdukhnykh trass* (Aviation Regulations. Pt. 170. Vol. II. Aerodrome and Airway Equipment Certification), 2015, pp. 111–112. (in Russ.)
2. Thompson K.P., Benitez P., Rolland J.P. *Optics and Photonics News*, 2012, no. 9(23), pp. 32–37.
3. Wang K. et al. *Freeform optics for LED packages and applications*, John Wiley & Sons, 2017.
4. Winston R. et al. *Nonimaging optics*, Elsevier, 2005.
5. Chaves J. *Introduction to nonimaging optics*, CRC press, 2017.
6. Koshel R.J., ed., *Illumination Engineering: Design with Nonimaging Optics*, John Wiley & Sons, 2012.
7. Gimenez-Benitez P. et al. *Optical Engineering*, 2004, no. 7(43), pp. 1489–1503.
8. Dross O. et al. *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems*, International Society for Optics and Photonics, 2004, vol. 5529, pp. 35–47.
9. Xu C.Y., Cheng H.B. *Lighting Research & Technology*, 2018, no. 6(50), pp. 937–951.
10. Cheng H. et al. *Applied optics*, 2015, no. 25(54), pp. 7632–7639.
11. Wang K. et al. *Optics Express*, 2011, no. 104(19), pp. A830–A840.
12. Parkyn W.A. *Current Developments in Optical Design and Optical Engineering VIII*, International Society for Optics and Photonics, 1999, vol. 3779, pp. 363–370.
13. Wang L., Qian K., Luo Y. *Applied optics*, 2007, no. 18(46), pp. 3716–3723.
14. Ding Y. et al. *Optics Express*, 2008, no. 17(16), pp. 12958–12966.
15. Landsberg G.S. *Optika* (Optics), Moscow, 1976. (in Russ.)
16. *Hybrid Light Simulation Software Lumiccept*, <https://integra.jp/en/products/lumiccept>.
17. *Samsung LEDs*, <https://www.samsung.com/led/lighting/high-power-leds/3535-leds/lh351b/>.

Data on authors

- Nikolay N. Bogdanov** — ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; Junior Scientist; E-mail: nnbogdanov@itmo.ru
- Dmitry D. Zhdanov** — PhD; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: ddzhdanov@mail.ru
- Igor S. Potemin** — PhD; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: ipotemin@yandex.ru

For citation: Bogdanov N. N., Zhdanov D. D., Potemin I. S. Method for calculating optical element for aviation obstruction lights of low intensity. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 7. P. 640—649 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-640-649